

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra pružnosti a pevnosti

Únavová analýza strojních součástí s využitím programu
PragTic

Fatigue analysis of machine parts using PragTic software

Student: Vítězslav Labaj

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.

Ostrava 2010

Zadání bakalářské práce

Student: **Vítězslav Labaj**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3901R003 Aplikovaná mechanika**
Téma: **Únavová analýza strojních součástí s využitím programu Pragtic**

Fatigue Analysis of Machine Parts Using Pragtic Software

Zásady pro vypracování:

1. Stručný teoretický úvod k vysokocyklové únavě materiálu, přístupy k posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí.
2. Popis programu Pragtic včetně soupisu predikčních kritérií.
3. Základní postupy použití programu Pragtic pro výpočtovou únavovou analýzu.
4. Popis konektivity Pragticu a konečnoprvkového programu Ansys, import a export dat.
5. Aplikace na vhodném příkladě z praxe.

Seznam doporučené odborné literatury:

KUČERA, J. Stručný úvod do mechaniky lomu, Část 2 – Únava materiálu, skripta VŠB-TUO, 1994.
PAPUGA, J. Mapping of Fatigue Damages – Program Shell of FE-Calculatation. PhD Thesis: Mechanics of Solids, Deformable Bodies and Continua branch, FSI ČVUT in Prague, 2005, 115s.
RŮŽIČKA, M. Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí. Učební texty. Ústav mechaniky FS ČVUT Praha, říjen 1998. [Cit 05/05/2003]
<http://mechanika.fs.cvut.cz/studium/literatura/k-211-html/ruza1/index.html>
FOJTÍK, F. Experimentální zařízení pro zkoušení víceosé únavy materiálu. Disertační práce v oboru Aplikovaná mechanika, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007.
ANSYS INC. Documentation for ANSYS Release 12.0. SAS IP, Inc., 2009.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Radim Halama, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



prof. Ing. Jan Fuxa, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Doc. Ing. Radimu Halamovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, za cenné rady a připomínky a podporu při jejím zpracování.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:.....

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Vítězslav Labaj

Adresa trvalého pobytu autora práce: Sosnová 365/15, 73961, Třinec

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

LABAJ, V. *Únavová analýza strojních součástí s využitím programu PragTic: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní Katedra pružnosti a pevnosti, 2010, 49 s. Vedoucí práce: Halama, R.

Bakalářská práce se zabývá únavovou analýzou strojních součástí, zaměřenou na vysokocyklovou únavu materiálu. Únavová analýza je provedena v programu PragTic. Účelem práce je popsat program PragTic, jeho spolupráci s konečnoprvkový programem Ansys, přiblížit a usnadnit jeho používání dalším uživatelům. Jako nástroj pro import posloužila hřídel ze zkušebního stroje pro kontaktní únavu. K řešení metodou konečných prvků je použit program Ansys 12. V rámci bakalářské práce bylo vytvořeno makro, které umožňuje transformaci potřebných dat z programu Ansys Workbench do programu PragTic. Makro je uloženo na přiloženém CD.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

LABAJ, V. *Fatigue analysis of machine parts using PragTic software: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of mechanical Engineering, Department of Mechanics, 2010, 49 s. Thesis head: Halama, R.

The submitted bachelor thesis deals with fatigue analysis of machine parts using PragTic software, focused on high cycle fatigue. The purpose of the thesis was describe PragTic software, its cooperation with Ansys software and approach its use to other users. Import tool was shaft from test machine for rolling contact fatigue research. The software Ansys 12 was used for the solution with help of the finite element method. In terms of this bachelor thesis was created macro, which allows printing the results from Ansys Workbench software into PragTic software. The macro is stored on enclosed CD.

Obsah bakalářské práce

Seznam použitých značek a symbolů.....	9
0. Úvod.....	11
1. Teoretický úvod k vysokocyklové únavě materiálu, přístupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí.....	11
1.1. Rozdělení únavy podle míry rozsahu plastické deformace	12
1.1.1. Nízkocyklová únava (low cycle fatigue).....	12
1.1.2. Vysokocyklová únava (high cycle fatigue)	12
1.2. Životnost tělesa.....	13
1.2.1. Stádium změn mechanických vlastností	13
1.2.2. Inicie a vznik mikrotrhlin	14
1.2.3. Šíření mikrotrhliny	14
1.2.4. Konečný náhlý lom	14
1.3. Mez únavy	14
1.4. Životnost strojních konstrukcí	15
1.4.1. Provozní zatížení, obvykle definované spektrem zatížení	16
1.4.2. Materiál, jeho mechanické a lomové vlastnosti	16
1.4.3. Tvar součástí	16
1.4.4. Technologie výroby součástí.....	16
1.5. Metody predikce životnosti	16
1.5.1. NSA (Nominal Stress Analysis).....	18
1.5.2. LESA (Local elastic stress analysis)	18
1.5.3. LPSA (Local Plastic Strain Analysis)	19
1.5.4. FMA (Fracture Mechanics Analysis).....	19
2. Popis programu PragTic a soupis predikčních kritérií	19
2.1. Nízkocyklová kritéria	22
2.1.1. Uniaxiální kritéria	22
2.1.2. Multiaxiální kritéria.....	22
2.2. Vysokocyklová kritéria.....	23
2.2.1. Kritérium podle Sinesa a Crosslanda	23
2.2.2. Kritérium podle McDiaminda.....	24
2.2.3. Kritérium podle Findleyho	25

2.2.4.	Kritérium podle Matakaeho	25
2.2.5.	Kritérium podle Dang Vana	25
2.2.6.	Kritérium podle Spagnoliho	26
2.2.7.	Kritérium podle Papadopulose	26
2.2.8.	Kritérium PCr (Papuga)	26
3.	Postup použití programu PragTic a konektivita s konečnoprvkovým programem	
Ansysis.....	27	
3.1.	Základní postup použití programu PragTic	27
3.1.1.	Import konečnoprvkového modelu.	27
3.1.2.	Definice souřadného systému.....	28
3.1.3.	Příprava únavové analýzy	28
3.2.	Popis konektivity PragTicu a Ansysu.....	29
4.	Ukázkový řešený příklad	30
4.1.	Příprava modelu v MKP programu Ansys	30
4.2.	Import souborů do PragTicu.....	34
4.3.	Export výsledků do Ansysu	39
5.	Závěr.....	41
6.	Seznam použité literatury.....	43

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
R_m	mez pevnosti	[MPa]
R_e	mez kluzu	[MPa]
σ_h	horní napětí	[MPa]
σ_n	dolní napětí	[MPa]
σ_a	amplitudové napětí	[MPa]
σ_m	střední napětí	[MPa]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
μ	Poissonovo číslo	[-]
N_f	počet cyklů do lomu	[-]
$f_{(c)}$	smyková složka napětí	[-]
$f_{(N)}$	normálová složka napětí	[-]
f_{-1}	mez únavy pro symetrický střídavý tah-tlak	[-]
σ_H	hydrostatický tlak	[MPa]
κ	poměr mezi únavy	[-]
f_0	mez únavy v opakujícím se tahu	[MPa]
F	přítlačná síla	[N]
M_k	krouticí moment	[N.m]

t_1	mez únavy pro symetrické střídavé kroucení[MPa]	
J_2	druhý invariant	[-]
S_u	pevnost v tahu	[MPa]
a, b	únavové parametry	[-]
MKP	Metoda konečných prvků	
RHS	levá strana rovnice	
LHS	pravá strana rovnice	

0. Úvod

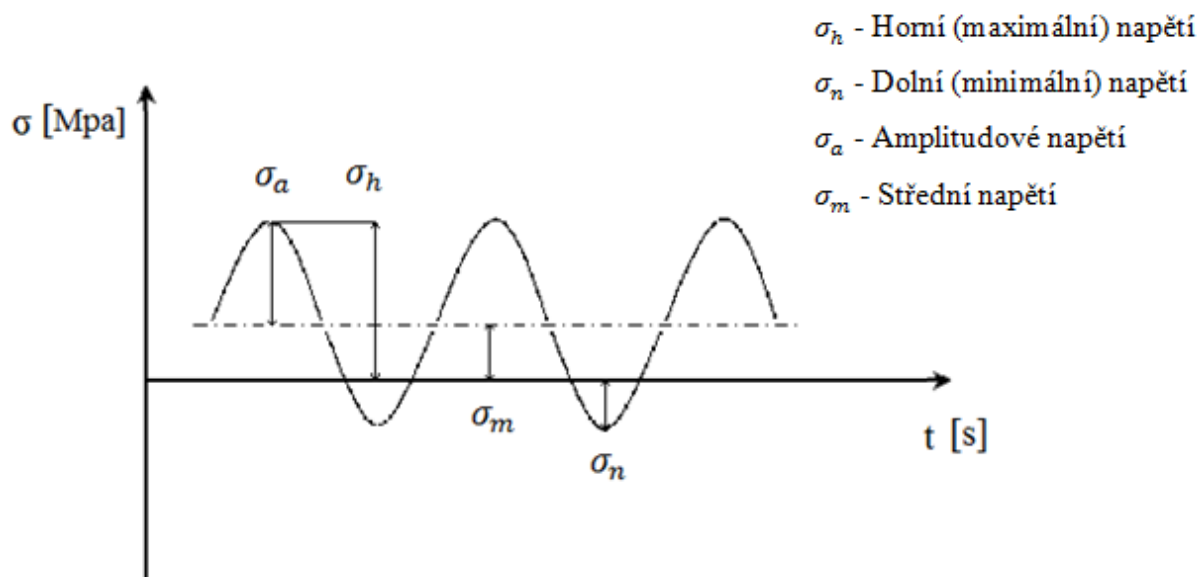
Řada strojních součástí je podrobena v průběhu své životnosti různým druhům namáhání, díky nimž dojde ke změnám ve struktuře a následně taky ke změnám mechanických vlastností. Dojde k iniciaci trhliny, jejímu následnému rozšíření, které vede až ke vzniku konečného únavového lomu. Tento proces nazýváme únava materiálu. První výzkum únavy prováděl od roku 1852 August Wöhler v souvislosti s lomy náprav železničních vozidel. Objevil souvislost mezi porušením a počtem otáček nápravy, neboli počtem zatěžných cyklů cyklického zatěžování. Wöhlerova křivka je dosud základní únavovou charakteristikou materiálu. V našem případě zúžíme tento pojem na pojem vysokocyklová únava materiálu. K vysokocyklové únavě dochází při počtu zatěžných cyklů větším než 10^5 .

1. Teoretický úvod k vysokocyklové únavě materiálu, přístupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí

Únavou materiálu rozumíme proces změn strukturního stavu materiálu a jeho vlastností vyvolaný kmitavým neboli cyklickým zatěžováním. Nejvyšší napětí je menší než mez pevnosti R_m a ve většině případů i menší než mez kluzu R_e . V materiálu dochází k hromadění poškození, které se v závěru procesu projeví růstem makroskopické trhliny a únavovým lomem.

Únavový lom je vždy výsledkem iniciace trhliny a jejího následného šíření. Iniciace trhliny nastane vlivem plastické deformace v iniciačních místech, které jsou na povrchu nebo v jeho bezprostřední blízkosti. Pro lom součásti, který vzniká v důsledku opakovaného zatížení, je rozhodující počet změn zatížení a nikoliv doba provozu. Poškození materiálu závisí na rozdílu maximálního napětí σ_h a minimálního napětí σ_n v nebezpečném místě (obr.1). Absolutní velikost napětí má až druhořadý vliv [2].

Únava materiálu je proces vzniku a šíření trhlin při časově proměnlivém zatěžování. Proto jedním z hlavních parametrů popisu je čas, případně počet zatěžných cyklů N v případě periodického zatěžování.



Obr. 1 Kmit napětí a označení veličin [3]

Podle obr. 1 lze popsat cyklické napětí vznikající například v rotujícím hřídeli.

1.1. Rozdělení únavy podle míry rozsahu plastické deformace

1.1.1. Nízkocyklová únava (low cycle fatigue)

Cyklická plastická deformace probíhá v makroobjemu, případně v celém průřezu tělesa. Rozhodující složkou při vzniku nízkocyklového únavového poškození je plastická deformace.

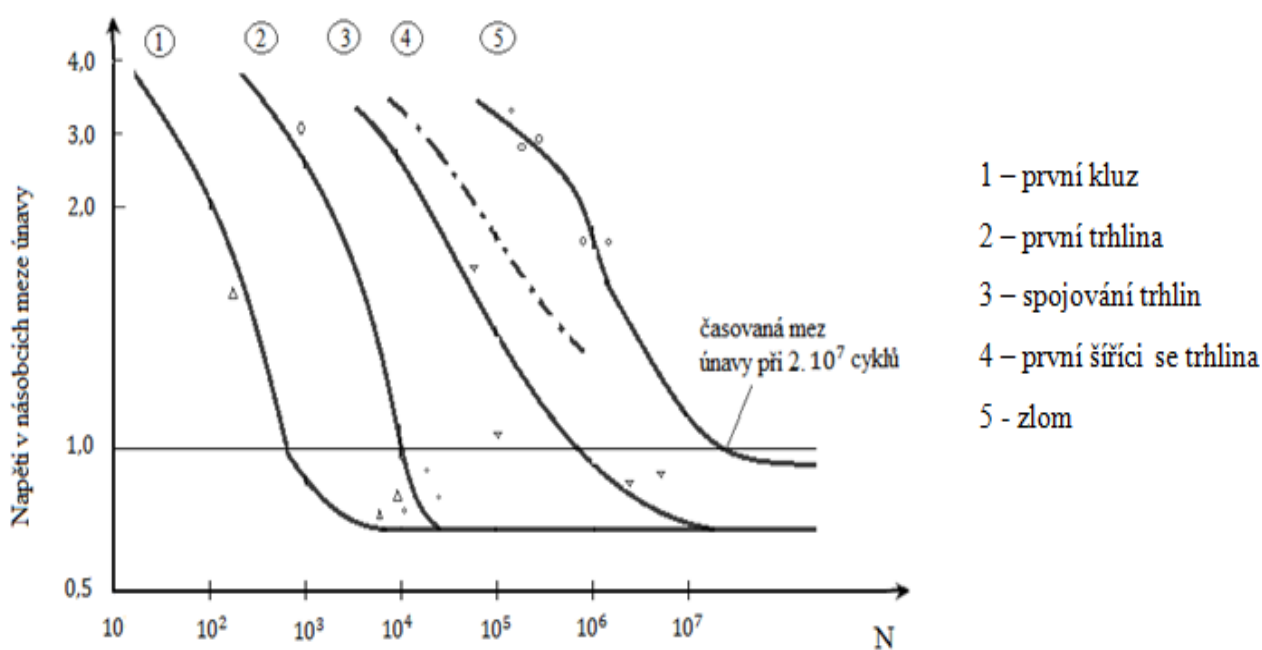
1.1.2. Vysokocyklová únava (high cycle fatigue)

Těleso se nachází ve stavu makroskopicky elastickém. Únavová porucha vzniká lokální plastickou deformací v mikroskopickém měřítku.

S rostoucím rozsahem cyklické plastické deformace životnost klesá. Hranice mezi vysokocyklovou a nízkocyklovou únavou se smluvně stanovuje životnosti. Pro nízkocyklovou únavu $10^2 \leq N_f \leq 10^5$ zatěžných cyklů, kde N_f je počet cyklů do lomu. Pro vysokocyklovou únavu $10^5 \leq N_f \leq 10^7$ zatěžných cyklů. Při životnosti pod 10^2 cyklů jde o extrémní

namáhání mimo oblast technické použitelnosti materiálu. U životností větší než 10^7 se jedná o tak zvanou gigacyklovou únavu.

Únavové poškození je od počátku zatěžování až do konečného lomu nevratným dějem. Obvykle však nejsou navenek patrné žádné známky trvalého poškození nebo jsou viditelné až v pokročilé fázi. Při mikroskopickém pohledu na strukturu materiálu, můžeme vidět únavové změny. Jednotlivé fáze poškození vytvářejí systém křivek analogických ke křivce konečné poruchy lomem, obr. 2. [3]



Obr.2 Křivky postupujícího únavového poškození

1.2. Životnost tělesa

Životnost tělesa v únavě můžeme rozdělit do čtyř fází [2].

1.2.1. Stádium změn mechanických vlastností

Vlivem kumulace plastické deformace se mění rozložení a hustota dislokací v materiálu. Dochází ke změně mechanických vlastností, změkčování, případně zpevňování materiálu až k ustálenému stavu. V těchto nukleačních místech dochází k iniciaci únavových trhlin.

1.2.2. Inicie a vznik mikrotrhlin

Nejčastěji se vyskytujícím nukleačním místem jsou skluzová pásma, jejichž tvorba zpravidla předchází i nukleaci v blízkosti hranic zrn. Dojde-li k pokluzu v jedné skluzové rovině krystalického zrna oceli, zpevní se tak, že další pokluz nastane již v rovině sousední. Při cyklickém zatěžování dochází ke vzniku intruzí a extruzí, které zakončují na povrchu části únavová skluzová pásma. Charakteristická je rovněž odlišnost dislokační struktury od okolní matrice. Pokračující cyklické zatěžování vede ke vzniku mikrotrhlin v intruzích. V místech největšího nakupení mikrotrhlin dochází k jejich spojování v delší povrchové trhliny. Po dosažení dostatečné délky se začínají šířit do hloubky materiálu pod povrch, ve směru kolmém na směr největšího napětí.

1.2.3. Šíření mikrotrhliny

Vzniklé mikrotrhliny neustále rostou, přičemž z důvodu nerovnoměrného rozložení napětí a deformace se z některé z nich stane trhlina řídící. Tato trhlina pak proroste značnou část vzorku, zatímco u ostatních trhlin je růst potlačen

1.2.4. Konečný náhlý lom

Konečný náhlý lom je konečnou fází únavového poškození. Jeho charakter se liší dle provozní teploty tělesa a odolnosti materiálu proti křehkému lomu.

1.3. Mez únavy

Mez únavy je takové nejvyšší vnější napětí, které spolu s koncentrací napětí na čelech mikrotrhlin u hranic strukturních překážek nestačí aktivovat zdroje dislokací za těmito překážkami. Na mezi únavy existují v materiálu trhliny o minimálních rozměrech, daných průměrnou vzdáleností strukturních překážek. Mez únavy se s délkou trhlin snižuje a vyšetřuje se většinou experimentálně.

V reálných tělesech strojních konstrukcí existují vždy koncentrátoři napětí, v nichž se přednostně iniciují trhliny. Chceme-li ověřit bezpečnost těchto kritických míst proti únavovému lomu, musíme znát mez únavy materiálu, z něhož je, nebo bude součást vyrobena. Jedná se o tak zvanou mez únavy hladkého tělesa, která je základním vstupním údajem dalšího výpočtu tělesa s vrubem [2].

Její hodnota záleží na celé řadě faktorů:

- **VLIV TEPLoty NA ÚNAVU MATERIÁLU**

Při nízkých teplotách se mez únavy zvyšuje podobně jako mez kluzu R_e a konvenční pevnost R_m .

- **VLIV FREKVENCE ZATĚŽOVÁNÍ**

Frekvence v oblasti vysokocyklové únavy nemá vliv na životnost v rozmezí 1-200 Hz.

- **VLIV VELIKOSTI TĚLESA**

Při namáhání tahem-tlakem jsou všechna zrna příčného průřezu namáhána stejně velkými vnějšími silami. Mez únavy s rostoucím průměrem mírně klesá.

- **VLIV JAKOSTI POVRCHU**

Jelikož kvalita povrchové vrstvy materiálu je určující pro fázi nukleace únavových trhlin, bude technologie povrchových úprav výrazně ovlivňovat mez únavy. K posouzení jakosti povrchu byl zaveden součinitel jakosti povrchu η_p , který udává poměr mezí únavy vzorku daného povrchu vůči povrchu leštěnému.

- **VLIV NESYMETRIE CYKLŮ**

Skutečné zatěžování elementů konstrukcí je zpravidla nesymetrické se statickou složkou napětí σ_m různou od nuly (obr. 1). Pokud tuto složku zvětšíme, musíme zmenšit amplitudu napětí, aby životnost součástí zůstala konstantní.

1.4. Životnost strojních konstrukcí

Složitá strojní konstrukce se skládá z celé řady částí a jejich poruchy můžeme rozdělit do dvou skupin [4]:

- Části, u kterých jejich porušení neohrožuje bezpečnost provozu ani životy lidí.
- Části, jejichž porucha ohrožuje bezpečnost nebo může mít katastrofický následek.

Počet součástí v jednotlivých skupinách, množství produkováných strojů a jejich technické parametry potom určují filosofii návrhu primárních částí konstrukce. Nejen v leteckém průmyslu, kde následující filosofie dimenzování vznikly, se dnes užívá pojmů safe-life, fail-safe nebo damage tolerance.

1.4.1. Provozní zatížení, obvykle definované spektrem zatížení

Životnost konstrukce závisí do značné míry na namáhání jejích částí a je determinována zatížením za provozu. Proto pro výpočtový návrh konstrukce je potřebné získat záznam provozních zatížení a z něho odvozená spektra zatížení.

1.4.2. Materiál, jeho mechanické a lomové vlastnosti

Kromě základních materiálových hodnot, získaných z tahové zkoušky, je důležité určovat vlastnosti materiálu při cyklickém namáhání. Určování materiálových konstant je vždy vázáno na konkrétní těleso. Na jeho tvar, kvalitu technologického opracování, tepelného zpracování a na velikost.

1.4.3. Tvar součástí

Tvarem součástí, okrajovými podmínkami, způsobem zatížení a elastickými konstantami materiálu je určeno rozložení napětí v součásti v elastickém stavu. Pro pevnostní i únavový výpočet je potřebné provést podrobnou analýzu napjatosti. Užívá se jak klasických metod pružnosti a pevnosti, tak numerických postupů, jako je metoda konečných prvků.

1.4.4. Technologie výroby součástí

U většiny strojních částí je určujícím místem iniciace defektů povrchová vrstva. Proto závisí na jakosti povrchu a na napětí v povrchové vrstvě. Se změnami vlastností povrchové vrstvy během života částí jsou potom úzce spojeny provozní podmínky a agresivita prostředí. S časovou změnou materiálových charakteristik a působením okolního prostředí dochází k degradaci materiálu během života součástí.

1.5. Metody predikce životnosti

Ačkoli metody odhadu únavového života reálných strojních částí byly a jsou předmětem rozsáhlého výzkumu a jsou publikovány v řadě publikací, nejsou výsledky metod dosud obecně platné. Uspokojivé výsledky lze docílit jen pro užší okruh řešených problémů, navíc

pouze v laboratorních podmínkách. Při tomto přístupu jsou typické úzce vymezené předpoklady i interpretace získaných výsledků [4].

- Časový průběh zatížení je popsán jednoduchými statistickými parametry.
- Jsou používány základní tvary zkušebních těles se známým kritickým řezem a rozložením napětí v něm.
- Lze jednoduše stanovit vstupní veličiny výpočtu jako je součinitel tvaru, faktor intenzity napětí, jmenovité napětí, lokální napětí a deformace v kořeni koncentrátoru.
- Jsou známy únavové křivky napětí nebo deformace pro navrhovaná tělesa.
- Predikce životnosti platí především pro materiál, pro který byla určena materiálová data.
- Predikce se vztahuje ke konkrétnímu tvaru části, k uvažovanému konkrétnímu spektru zatížení a k ověřené technologické úpravě povrchu části.

Naproti tomu potřeba předpovídat životnost částí v průmyslové praxi se vyznačuje širokým polem dalších vlivů.

- Zatížení jsou často neznámá, známa jsou jen návrhová, modelová nebo jinak odvozená spektra.
- S dostatečnou přesností nejsou známa kritická místa únavových poruch, jejich mechanismus šíření a kritické délky defektů.
- Výpočet nominálních napětí je problematický, zejména u členitých dílů složité geometrie namáhaných vícesložkovým zatížením.
- Rozptyly materiálových vlastností (pevnosti, houževnatosti apod.) musí být uváženy pro různé tavby a do výpočtu by měly být uváženy hodnoty odpovídající vysoké pravděpodobnosti výskytu.
- Z finančních důvodů nebývají předmětem únavových zkoušek často celé konstrukce, nýbrž pouze jejich části nebo jen modelové vzorky.

Konkrétní výpočtové postupy predikce životnosti, které jsou dnes nejčastěji užívány, lze rozdělit do následujících skupin.

- Přístup predikce přes nominální napětí (NSA)
- Přístup predikce přes lokální elastická napětí (LESA)
- Přístup predikce přes lokální elasticko-plastická napětí a deformace (LPSA)
- Přístup predikce přes lomovou mechaniku (FMA)

1.5.1. NSA (Nominal Stress Analysis)

Je historicky nejstarší metoda navrhování konstrukcí na únavu. Vyvíjela se společně s hodnocením tvarové pevnosti částí, založené na vztahování špiček napětí ve vrubech k hladině nominálních namáhání, která bylo možno určit na základě klasických analytických postupů užívaných v pružnosti a pevnosti.

1.5.2. LESA (Local elastic stress analysis)

Metodika LESA využívá hookeovských elastických napětí v místech koncentrátorů napětí. Je tedy modifikací přístupu nominálního napětí NSA. K výpočtu je možno použít jedinou únavovou křivku napětí a to pro hladký nevrubovaný vzorek. Výpočet únavového poškození může být proveden pomocí libovolné zvolené metody kumulace poškození a je interpretován jako život do vzniku technické makrotrhliny v kontrolovaném místě. Makrotrhlinou v tomto smyslu rozumíme trhliny, které jsou větší než strukturní částice. Zpravidla to jsou trhliny délek nad 0,5 až 1 mm a více.

Postupy NSA a LESA jsou založeny na kumulaci únavových poškození od kmitů nominálních napětí v kontrolovaném řezu nebo z lokálních elastických napětí v oblasti koncentrátorů. Toto poškození je určováno vůči únavové křivce napětí (Wöhlerově křivce). Oba přístupy se liší, tím jestli je uvažována:

- Wöhlerova křivka platná pro danou vrubovitost kritického místa konstrukce a kmitavá napětí v nominálním průřezu součásti, nebo
- Wöhlerova křivka odpovídající hladké nevrubované tyči a korigované hodnoty elastických napětí v lokálních oblastech konstrukce (v kritických vrubech).

1.5.3. LPSA (Local Plastic Strain Analysis)

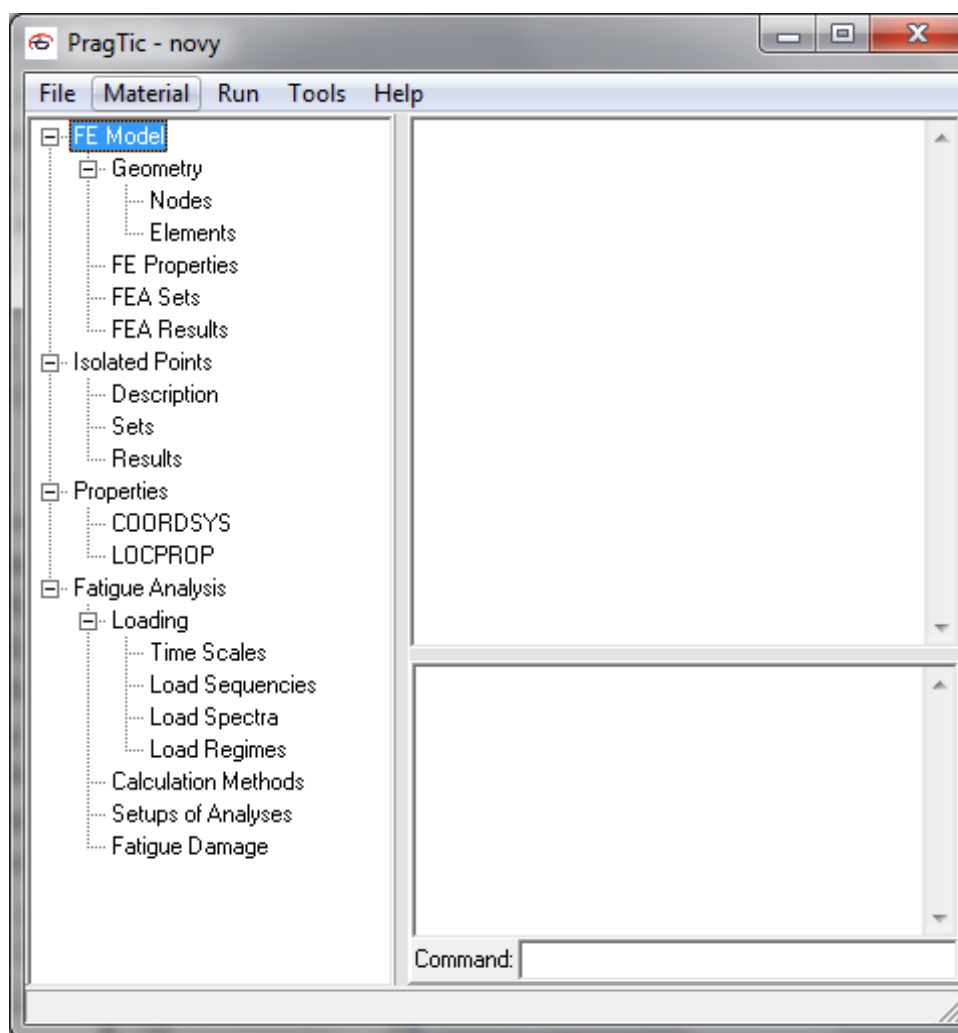
O poškozovacím procesu v metodě LPSA rozhodují napět'ové a deformační poměry v malé lokální oblasti (podobně jako v koncepci LESA), která je vymezena exponovaným objemem v okolí koncentrátoru napětí. Neuvažují se zde však fiktivní elastické hodnoty, nýbrž skutečná elasto-plastická napětí a poměrné deformace.

1.5.4. FMA (Fracture Mechanics Analysis)

Tato metoda tvoří základ filosofie konstruování s přípustným poškozením (damage tolerance), ale jelikož nepatří do vysokocyklové únavy nebude dále rozebíraná.

2. Popis programu PragTic a soupis predikčních kritérií

Program PragTic je bezplatný software, volně ke stažení na internetových stránkách www.pragtic.com. Používá se pro automatizované řešení buď na únavu konečnoprvkových dat, nebo v izolovaných místech bez vztahu ke konkrétnímu modelu. Jeho autorem je ing. Jan Papuga, Ph.D. Tento program vznikl v souvislosti přípravy disertační práce jako nástroj pro podporu výpočtů. Výhodou je, že výpočty lze spustit na určitou skupinu uzlů hned několika výpočetními metodami současně. Existuje řada konečnoprvkových systémů a každý z nich používá své vlastní datové struktury formátů souborů. Avšak společné pro všechny je schopnost připravit ASCII soubor, kde jsou údaje sestavené do sloupců a řádků. Obvykle sloupec odpovídá jedné konkrétní proměnné, zatímco jeden nebo více řádků se vztahují k popisu těchto proměnných pro jeden objekt konečnoprvkového modelu. PragTic má vlastní databázi všech vstupních položek. To znamená, že každý úkol obsahuje fyzicky také konečnoprvkové data. Většinu subjektů shromážděných v databázi si můžeme prohlédnout nebo i přímo v programu upravit. PragTic proto můžeme chápat jako univerzální post-procesor.



Obr. 3. Hlavní okno

Hlavní okno programu PragTic je rozděleno do několika částí.

Menu- nachází se v horní části hlavního okna.

Stromová databáze- zabírá levou část hlavního okna. Je rozdělená do čtyř hlavních bodů.

FE-model – zahrnuje definici prvků a uzlů dohromady s parametry prvků skupiny. Prvně se musí importovat uzly, jelikož prvky jsou na nich závislé.

Geometry – geometrie je plně definována uzly a prvky. Žádné jiné subjekty použité pro vytvoření konečnoprvkového modelu se neimportují do PragTicu (jako například plochy, objemy).

FE Properties – tato položka se skládá z proměnných prvků skupiny a reálných konstant. Obě tyto položky jsou závislé na konkrétním typu prvků a jejich struktura je definovaná v knihovně prvků.

FEA sets – jsou definovány v konečnoprvkovém modelu a mohou obsahovat buď uzly, nebo prvky. Ty mohou být importovány, nebo mohou být vytvořeny přímo v programu.

FE results – výsledky mohou být definovány v uzlech, na prvcích nebo v uzlech prvků.

Isolated points - izolované body jsou náhradou za konečnoprvkový model a používají se v případech, kdy není nutné importování modelu do PragTicu.

Description – izolované body musí být vytvořeny přímo v PragTicu, jelikož jsou to oddělené body s nejasným vztahem k jakékoli konkrétní struktuře. Každý izolovaný bod je definován pomocí svého ID-name a souřadnic. Izolované body jsou definovány v kartézském souřadném systému.

Sets – zde můžeme prohlížet, upravovat nebo vytvářet sady izolovaných bodů.

Results – každý izolovaný bod má svoji sadu výsledků. Výsledky tykající se jednotlivých bodů jsou jednodušší ve srovnání s výsledky konečnoprvkového modelu.

Properties – zde patří vlastnosti subjektů, které jsou společné pro izolované body i pro konečnoprvkový model (souřadnicový systém, vlastnosti struktury, materiál)

Fatigue analysis – únavová analýza

Loading – zatížení může být založeno na několika typech zdrojů.

Time scales - popisuje časové okamžiky, ve kterém jsou zaznamenány zatížení.

Load sequencies – záznam zatížení bez souvisejícího časového údaje.

Load spectra – spektrum zatížení může být importováno nebo vloženo pomocí příkazového řádku.

Load regimes – režim zatížení je kombinací všech zatížení a jejich vlivu na strukturu, které se uskuteční během stejného časového období.

Calculation methods – týká se nastavení zvolené výpočetní metody.

Setups of analyses – slouží ke spuštění výpočtové analýzy. Analýza únavového poškození může být spuštěna ve všech možných kombinacích:

Load Regimes sheet – zde je definovaná většina režimu zatížení.

Calculation Methods sheet – zde se nacházejí všechny výpočetní metody v rámci daného úkolu.

On Nodes/Elements/Isolated Points sheet – zde jsou definované všechny sady uzlů a izolovaných bodů na kterých může být spuštěná analýza.

Fatigue damage – toto se týká výsledků a operace s nimi.

Command – příkazový řádek, který slouží k rychlejšímu zadávání příkazů.

Status bar – nachází se ve spodní části hlavního okna. Zobrazuje se zde záznam únavové analýzy.

Report window – je plocha na pravé straně hlavního okna. Zde se vypisují všechny upozornění a chyby. A rovněž si zde můžeme prohlédnout průběh únavového poškození.

Predikční kritéria můžeme rozdělit z několika hledisek. Nejobecnější je však rozdělení na kritéria vysokocyklová a nízkocyklová.

2.1. Nízkocyklová kritéria

Jelikož tato bakalářská práce je zaměřena na vysokocyklovou únavu, nízkocyklová kritéria jsou zde uvedena jen okrajově a nejsou dále rozebírána.

2.1.1. Uniaxiální kritéria

- Smith, Watson & Topperovo kritérium
- Landgrafovo kritérium
- Bergmannovo kritérium
- Erdogan & Robertsovo kritérium
- Heitmannovo kritérium
- Feltnerovo kritérium
- Morrowovo kritérium
- Pospisilovo kritérium

2.1.2. Multiaxiální kritéria

- Findleyho kritérium definované podle Socieho
- Sociovo kritérium
- Wang & Brownovo kritérium

2.2. Vysokocyklová kritéria

Jakékoliv dimenzování ve vysokocyklové únavě je založeno na posouzení, jestli součást vydrží nekonečné zatěžování. Běžně používané vzorce v této skupině kritérií, lze přepsat jako kombinace smykového napětí C a normálového napětí N [5], tedy

$$a \cdot f(C) + b \cdot g(N) \leq f_{-1} \quad (1)$$

a, b únavové parametry

$f(C)$ smyková složka napětí

$g(N)$ normálová složka napětí

f_{-1} je mez únavy v převrácené hodnotě

Obecně se předpokládá, že smyková složka C ovládne proces poškození, zatímco u normálové složky N se očekává nějaký vedlejší efekt. Pokud data na levé straně odpovídají experimentálně zjištěné mezi únavy, může být dosažen ideální stav. Únavový index ΔFI ukazuje míru odchylky od ideální rovnosti

$$\Delta FI = \left(\frac{LHS(load) - RHS(material)}{RHS(material)} \right) \cdot 100\% , \quad (2)$$

kde RHS definuje pravou stranu rovnice a LHS levou stranu rovnice.

Predikce pro experimentálně ověřenou únavu by měla vést k $LHS=RHS$ ($\Delta FI = 0$). Pokud LHS je vyšší, znamená to, že součást může selhat při nižším zatížení. V této práci jsou stručně komentována vybraná kritéria zahrnutá v programu PragTic. Jejich vzájemné srovnání z hlediska „kvality“ predikce lze najít například v [15].

2.2.1. Kritérium podle Sinese a Crosslanda

[6], [7]

Crossland a Sines publikovali své práce v 50. letech dvacátého století. Jejich kriteria jsou si velice podobná. Využili jako základ amplitudu druhého tenzoru napětí. Další pojem, který je přidán do rovnice je první tenzor napětí (hydrostatický tlak). Zatímco Sines preferoval jeho střední hodnotu

$$a_s \cdot (\sqrt{J_2})_a + b_s \cdot \sigma_{H,m} \leq f_{-1} , \quad (3)$$

Crossland doporučoval používat jeho nejvyšší hodnotu:

$$a_c \cdot (\sqrt{J_2})_a + b_c \cdot \sigma_{H,max} \leq f_{-1}, \quad (4)$$

kde koeficienty a, b jsou definovány jako:

$$\begin{aligned} a_s &= \kappa, \\ b_s &= 6 \left(\frac{f_{-1}}{f_0} - \sqrt{3}\kappa \right), \end{aligned} \quad (5)$$

pro Sinese, zatímco pro Crosslanda

$$\begin{aligned} a_c &= \kappa, \\ b_c &= (3 - \sqrt{3}\kappa) \end{aligned} \quad (6)$$

a zbývající parametry jsou:

J_2	druhý invariant tenzoru napětí
$\sigma_{H,m}$	maximální hodnota hydrostatického napětí
κ	poměr mezí únavy $\left(\kappa = \frac{f_{-1}}{t_{-1}} \right)$
f_0	mez únavy pro míjivý tah
t_{-1}	mez únavy ve zcela obráceném krutu

2.2.2. Kritérium podle McDiarminda

[8]

Toto kritérium je široce používané. Existuje i starší verze, avšak ta dnes už není prakticky použitelná. Na základě rozsáhlého testování, stanovil McDiarmid konečnou formu této metody

$$\frac{f_{-1}}{t_{AB}} C_a + \frac{f_{-1}}{2 \cdot S_u} N_{max} \leq f_{-1}, \quad (7)$$

kde S_u vyjadřuje pevnost v tahu a t_{AB} mez únavy v symetrickém střídavém krutu s trhlinou v systému A nebo B.

Symbol t_{AB} nám umožňuje volbu mezi t_A a t_B odpovídající podmínkám zatížení, které vedly ke vzniku trhliny v A a B systému. Pro typ A je charakteristická trhlina rovnoběžná s povrchem. U typu B vede trhlina dovnitř směrem od povrchu.

2.2.3. Kritérium podle Findleyho

[9]

Jedná se o první rovinné predikční kritérium. Na rozdíl od McDiarmida, který koeficienty stanovil na základě rozsáhlého testování, Findley je odvodil z jednoosé zkoušky

$$a_F \cdot C_a + b_F \cdot N_{max} \leq f_{-1}. \quad (8)$$

Výpočet obou materiálových proměnných je založen na dvou provedeních, a to v symetrickém střídavém tahu a krutu

$$\begin{aligned} a_F &= 2\sqrt{\kappa - 1}, \\ b_F &= 2 - \kappa. \end{aligned} \quad (9)$$

2.2.4. Kritérium podle Matakeho

[10]

Matakeho kritérium je zapsáno stejným způsobem jako Findleyho kritérium, tedy

$$a_M \cdot C_{a,MSSR} + b_M \cdot N_{max,MSSR} \leq f_{-1}, \quad (10)$$

avšak rozdíl je zde v definici kritické roviny, což je rovina s maximálním C_a (s minimálním rozsahem napětí).

2.2.5. Kritérium podle Dang Vana

[11]

Dang Van začal větví mesoskopických kritérií. Tyto kritéria mají společné, že ne makroskopické množství ale jeho mesoskopický protějšek je třeba zkontrolovat na únavu. Dang Van zahájil řešení a prezentoval způsob transformace mesoskopického množství vzhledem k makroskopickému napětí. Řešení v PragTicu se vztahuje pouze na mez únavy

$$a_{DV} \cdot C_a + b_{DV} \cdot \sigma_{H,max} \leq f_{-1}. \quad (11)$$

2.2.6. Kritérium podle Spagnoliho

[12]

Spagnoli využívá koncepce kritické roviny. Výsledky vycházejí podobně jako u Matakeho metody, avšak s menším rozsahem

$$\sqrt{a_S \cdot C_a^2 + b_S \cdot N_{max}^2} \leq f_{-1}, \quad (12)$$

kde materiálové parametry jsou

$$\begin{aligned} a_S &= \kappa^2, \\ b_S &= 1. \end{aligned} \quad (13)$$

2.2.7. Kritérium podle Papadopulose

[13]

Papadopoulos navazuje na Dang Vana v mesoskopických kritériích, ale na rozdíl od Dang Vana, se rozhodl pro integraci vstupních proměnných ve všech rovinách

$$\sqrt{a_P \cdot \langle T_a^2 \rangle} + b_P \cdot \sigma_{H,max} \leq f_{-1}, \quad (14)$$

únavové parametry jsou pak definovány jako

$$\begin{aligned} a_P &= 5\kappa^2, \\ b_P &= 3 - \sqrt{3}\kappa. \end{aligned} \quad (15)$$

2.2.8. Kritérium PCr (Papuga)

[5], [14]

Původně bylo toto kritérium vhodné pouze pro křehké materiály a jeho použití pro jiné materiály proto vedlo ke konzervativní predikci. Po dalším zkoumání ale došlo k optimalizaci. Dnes tato metoda dává nejpřesnější výsledky ze všech výše zmíněných metod a je definováno

$$\sqrt{a_C \cdot C_a^2} + b_C \cdot N_a + \frac{t_{-1}}{f_0} \cdot N_a \leq f_{-1}, \quad (16)$$

jestliže je poměr mezí únavy

$$\kappa < \sqrt{\frac{4}{3}} \cong 1.155, \text{ pak: } a_c = \frac{\kappa^2}{2} + \frac{\sqrt{\kappa^4 - \kappa^2}}{2}, b_c = f_n, \quad (17)$$

$$\kappa \geq \sqrt{\frac{4}{3}} \cong 1.155, \text{ pak: } a_c = \left(\frac{4\kappa^2}{4+\kappa^2} \right), b_c = \frac{8f_{-1} \cdot \kappa^2 \cdot (4-\kappa^2)}{(4+\kappa^2)^2}. \quad (18)$$

3. Postup použití programu PragTic a konektivita s konečnoprvkovým programem

Ansyz

Postupuje se dle stromové struktury uvedené na obr. 3. Provádění importu do programu PragTic lze provést dvěma způsoby. Prvním způsobem je import celého konečnoprvkového modelu. Druhým způsobem je import přes izolované body. Izolované body jsou body ukotvené do prostoru, bez vazby na konečnoprvkový model. Kromě definice bodu je pak třeba definovat i normálu k tomuto bodu, který leží na určitém povrchu, proto tento způsob není vhodný pro přístupy, kde se zohledňuje směr normály k povrchu. Možnost izolovaných bodů lze použít například, když se vychází u únavové analýzy z analytického řešení nebo experimentu (tenzometrická měření).

3.1. Základní postup použití programu PragTic

3.1.1. Import konečnoprvkového modelu.

Při importu se postupně načtou definice uzlů, prvků a nakonec data výsledků.

- NAČTENÍ UZLŮ

Uzly importujeme jako první, jelikož prvky jsou na nich závislé, avšak je třeba připomenout, že pokud do PragTicu vložíme prvky a k nim nejsou příslušné uzly, PragTic je imaginárně vytvoří. Do PragTicu se načte soubor NLIST.lis (file→import→NLIST.lis). Jelikož importujeme uzly, musíme zatrhnout v obsahu nodes. Separátor nastavíme jako pevný (hard) a bude se oddělovat mezerou (space). Jako první stanovíme hlavičku, do které bude patřit vše, co se nachází nad čísly uzlů. Pokud se při načítání řádků objeví některý řádek z hlavičky, PragTic jej při importu přeskočí. Po určení prvního řádku dat, nastavíme

separátor, který nám bude oddělovat jednotlivé sloupce od sebe. Jednoduše to provedeme pravým tlačítkem na myši. Po ukončení separace nám dole naskočí tabulka, ve které je třeba definovat proměnné (číslo uzlů, souřadnice). Nakonec spustíme skenování a nahrajeme data do PragTicu.

Tuto mapu si uložíme příkazem Save Map a můžeme ji použít při dalším importování uzlů. Příkazem Read Map lze mapu načíst a odpadne tím další nastavování mapy.

- **NAČTENÍ ELEMENTŮ**

Načtení elementů probíhá podobným způsobem jako načtení uzlů (file→import→ELIST.lis), s tím rozdílem, že separátor nastavíme automatický (automated). Následně je potřeba definovat typ elementů, který PragTic podporuje. Pokud data exportujeme z Ansysu je výběr možný mezi třemi typy elementů (solid45, solid92, solid95).

- **NAČTENÍ VÝSLEDKŮ**

Při importu sad výsledků je nutno zatrhnout v obsahu results. Separátor nastavíme automatický. Pokud je součást namáhána více způsoby je nutné načíst každý zátěžný cyklus zvlášť. (file→import→PRNSOL.lis)

3.1.2. Definice souřadného systému

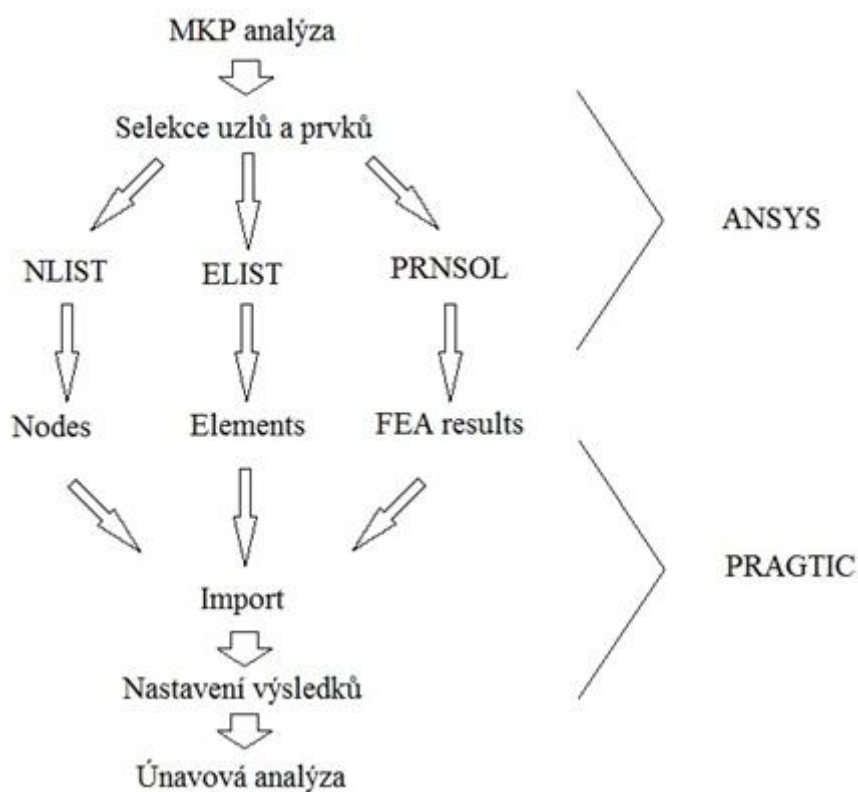
Při definici souřadného systému máme na výběr mezi třemi systémy (cylindrický, sférický, kartézský).

3.1.3. Příprava únavové analýzy

Jako první je třeba definovat materiál. Materiály v databázi PragTicu jsou označeny dle různých norem (DIN, ASTM, atd.), proto chceme-li použít ekvivalentní materiálová data pro materiál, k němuž nemáme únavové parametry, je nezbytné dohledat jejich ČSN normu ve srovnávacích tabulkách [16]. Režim zatížení nastavíme pro každý zátěžný cyklus zvlášť. Vybereme metody, podle kterých chceme počítat a každé přiřadíme své ID-name. Výpočet je možno spustit buď na jednu, nebo více metod zároveň.

3.2. Popis konektivity PragTicu a Ansysu

Do PragTicu lze importovat data z několika konečnoprvkových programů, jako například Ansys, Abaqus, Cosmos, Nastran, Femap. Při exportu dat z Workbenche můžeme model převést buď do klasického rozhraní Ansysu (Mechanical APDL), nebo pomocí makra můžeme vypsat požadovaná data přímo z Workbenche. Na obr. 4. je názorně předvedeno, jak se postupuje.



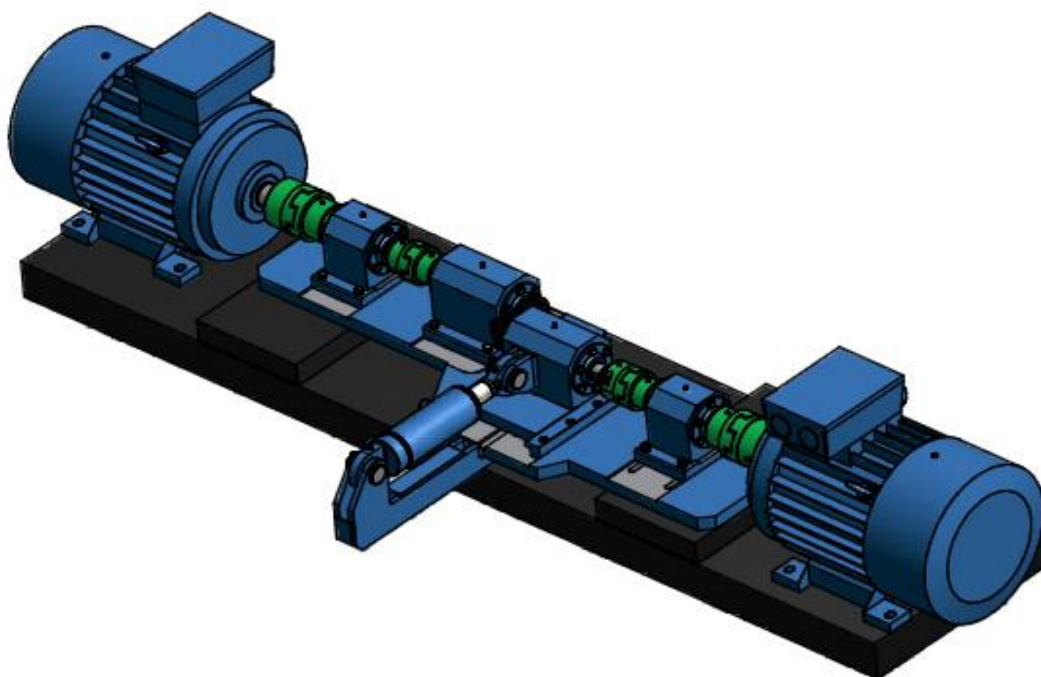
Obr. 4 Schéma postupu při importování dat do PragTicu

Výsledky únavové analýzy lze z PragTicu zpětně načíst do programu Ansys a využít jeho metod pro výpis a zobrazování výsledků. Podrobný postup je popsán v kapitole 4. Tato forma je zvolena s ohledem na použití specifických funkcí v programu Ansys.

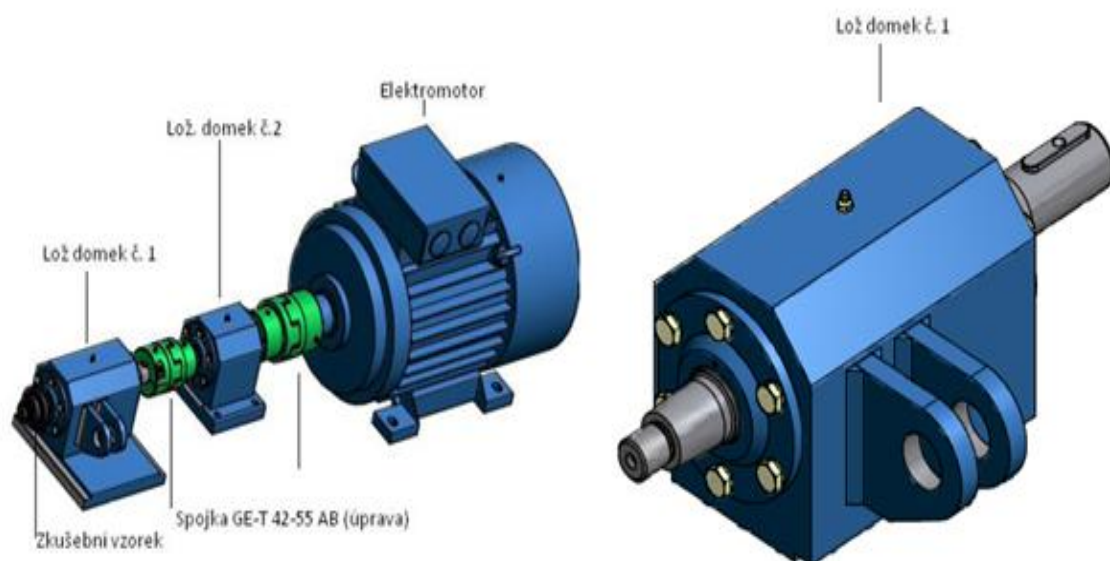
4. Ukázkový řešený příklad

4.1. Příprava modelu v MKP programu Ansys

Ukázková aplikace byla převzata z diplomové práce z roku 2009, jejímž autorem je Ing. Michal Šofer. Jedná se o hřídel, která je součástí zkušebního stroje na výzkum kontaktní únavy (obr. 5). Tato hřídel je součástí ložiskového domku č. 1 (obr. 6). Je uložena na dvou ložiskách. Jedná se o dvouřadá soudečková ložiska typu 222 09E (SKF). Při zadávání okrajových podmínek se vychází z uspořádání ložiskového domku. Jedno ložisko zabraňuje posuvu v radiálním směru a druhé ložisko zabraňuje posuvu v radiálním i axiálním směru. Tomu odpovídají okrajové podmínky zadané v konečnoprvkové analýze viz okrajové podmínky A, B na obr. 7. Okrajová podmínka C znázorňuje přitlačnou sílu o velikosti 8370 N, působící na kuželovou plochu a maximální krouticí moment, který je 200 Nm. Všechny hodnoty okrajových podmínek byly převzaty z výše zmíněné diplomové práce.



Obr. 5 3D model zkušebního stroje na kontaktní únavu [17]



Obr. 6 3D model pravého pohonu a ložiskového domku č.1

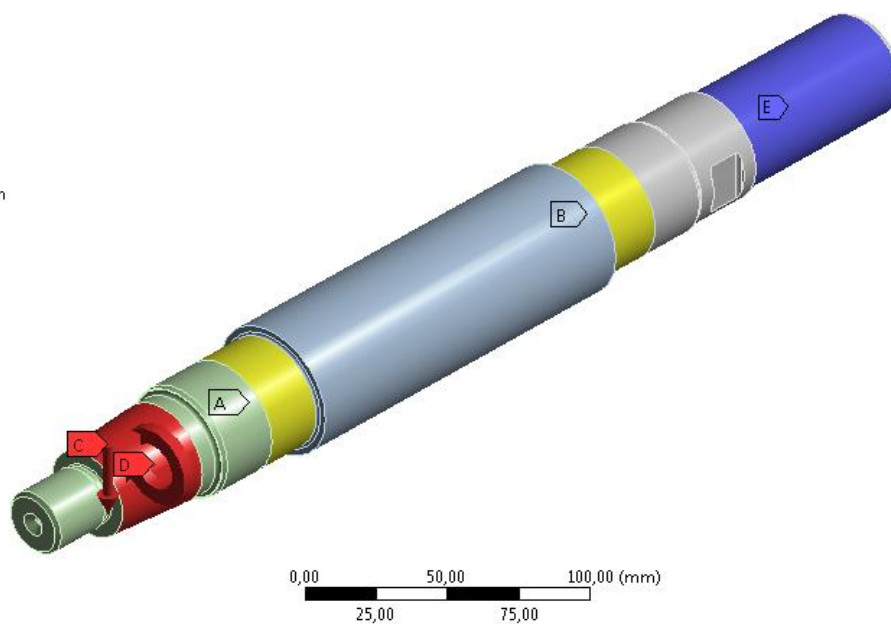
A: Static Structural (ANSYS)

Static Structural

Time: 1, s

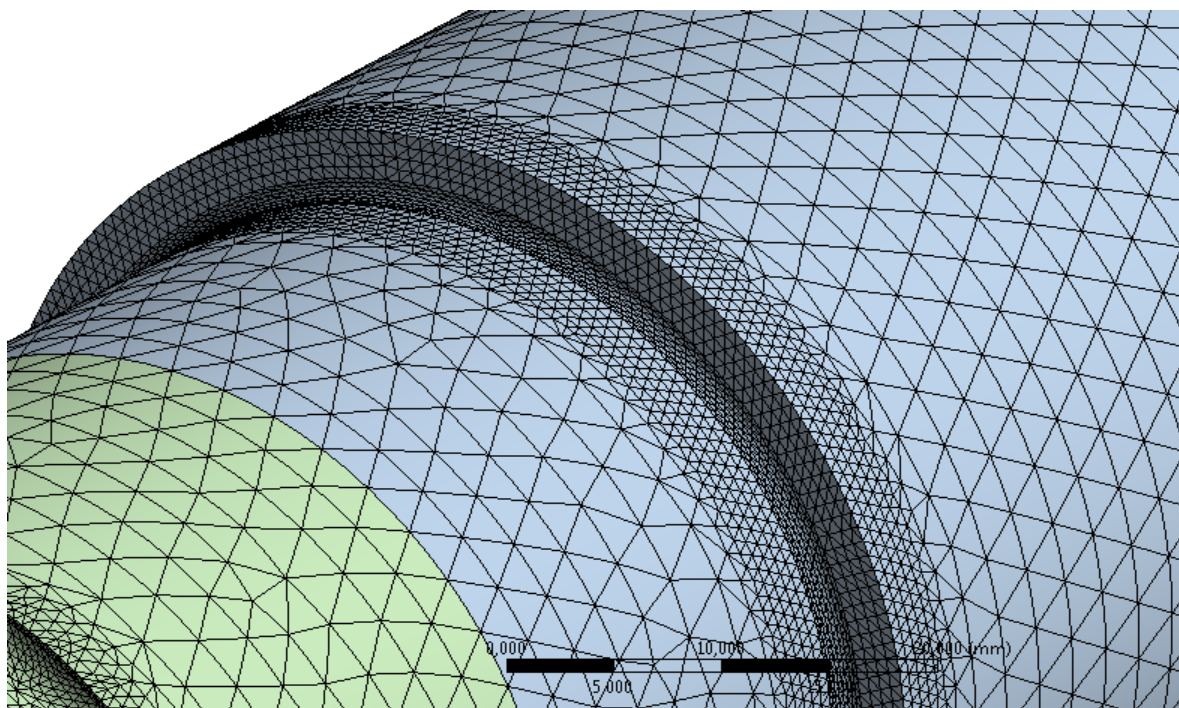
18.4.2010 19:56

- A** Remote Displacement
- B** Remote Displacement 2
- C** Force: 8370, N
- D** Moment: 2,e+005 N-mm
- E** Cylindrical Support: 0, mm

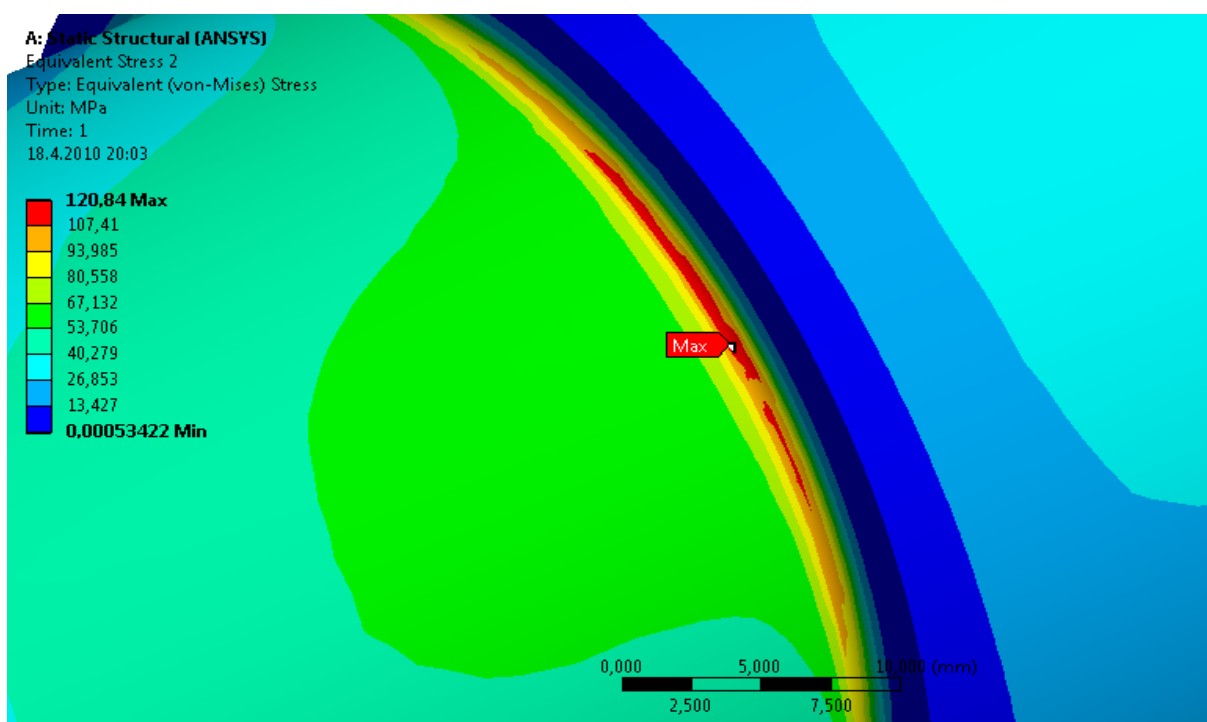


Obr. 7 3D model hřídele s okrajovými podmínkami

Ve výpočtu byl uvažován materiál 11600. Zadán byl tedy jako izotropní elastický materiál s modulem pružnosti 210GPa a Poissonovou konstantou 0,3.



Obr. 8 Vytvořená síť

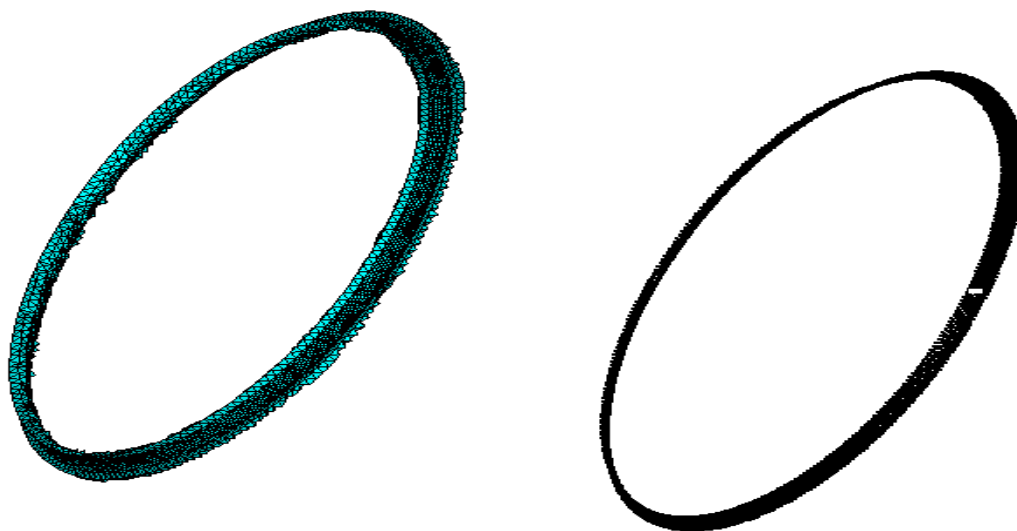


Obr. 9 Zobrazení průběhu ekvivalentního napětí v kritickém místě

Nejvíce namáhané místo se nachází pod ložiskem, proto zde byla zjemněna síť. Hodnota maximálního ekvivalentního napětí je 120,84 MPa. Celkový počet uzlů je 575076 a prvků 403543. Pro vypsání informací o uzlech, elementech a výsledcích je nutno model převést to klasického rozhraní Ansysu. Z tohoto důvodu bylo vytvořeno makro (obr. 10), díky němuž můžeme vypsát informace přímo z Workbenche. Pro zkrácení času výpočtové únavové analýzy, byly vypsány pouze uzly a prvky, které náleží nejvíce namáhané části (obr. 11). Počet uzlů, vstupujících do únavové analýzy, se tedy redukuje na 6764 a počet prvků na 11734.

```
/PREP7  
CMSEL,S,ZAOBLENI  
NSLA,S,1  
ESLN,S  
/OUTPUT,UZLY,TXT  
NLIST  
/OUTPUT,TERM  
/OUTPUT,ELEMENTY,TXT  
ELIST  
/OUTPUT,TERM  
/POST1  
SET,LAST  
/HEADER,OFF  
/OUTPUT,VYSLEDKY,TXT  
PRNSOL,S,COMP  
/OUTPUT,TERM
```

Obr. 10 Makro pro vypsání dat z programu Ansys Workbench

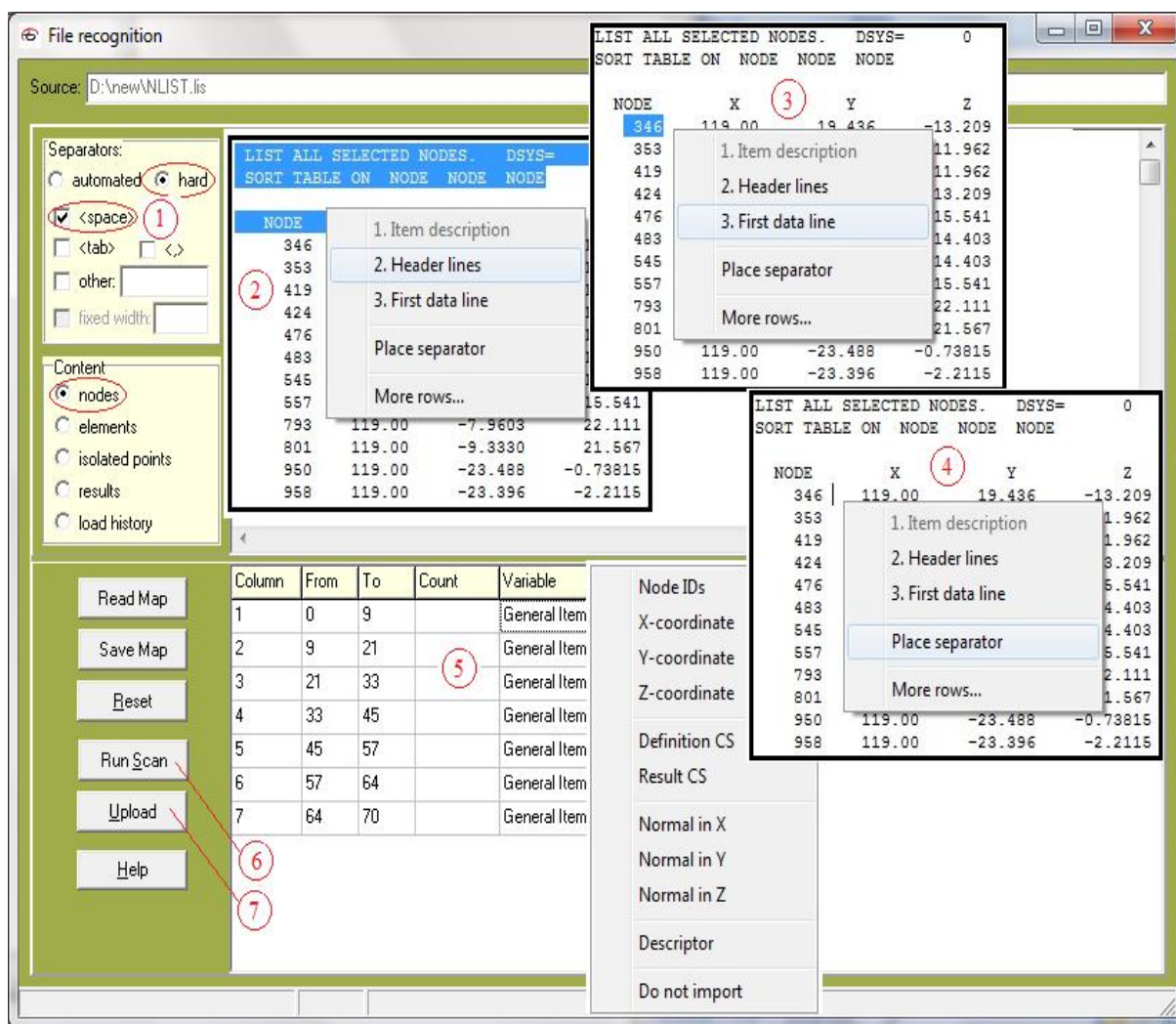


Obr. 11 Ukázka uzlů a elementů vybraných pro únavovou analýzu

Součást je namáhána krutem a ohybem, přičemž bude uvažován konstantní krouticí moment a ohyb za rotace. Z tohoto důvodu je nutné řešit pomocí MKP každý tento zátěžný stav zvlášť. Pro každý případ vypíšeme výsledky. Pro ohyb budeme uvažovat pouze přítláčnou sílu a pro krut maximální krouticí moment, který na součást působí. Dostaneme čtyři soubory, které nyní můžeme importovat do PragTicu. Při importu se budeme řídit stromovou databází PragTicu (obr. 3).

4.2. Import souborů do PragTicu

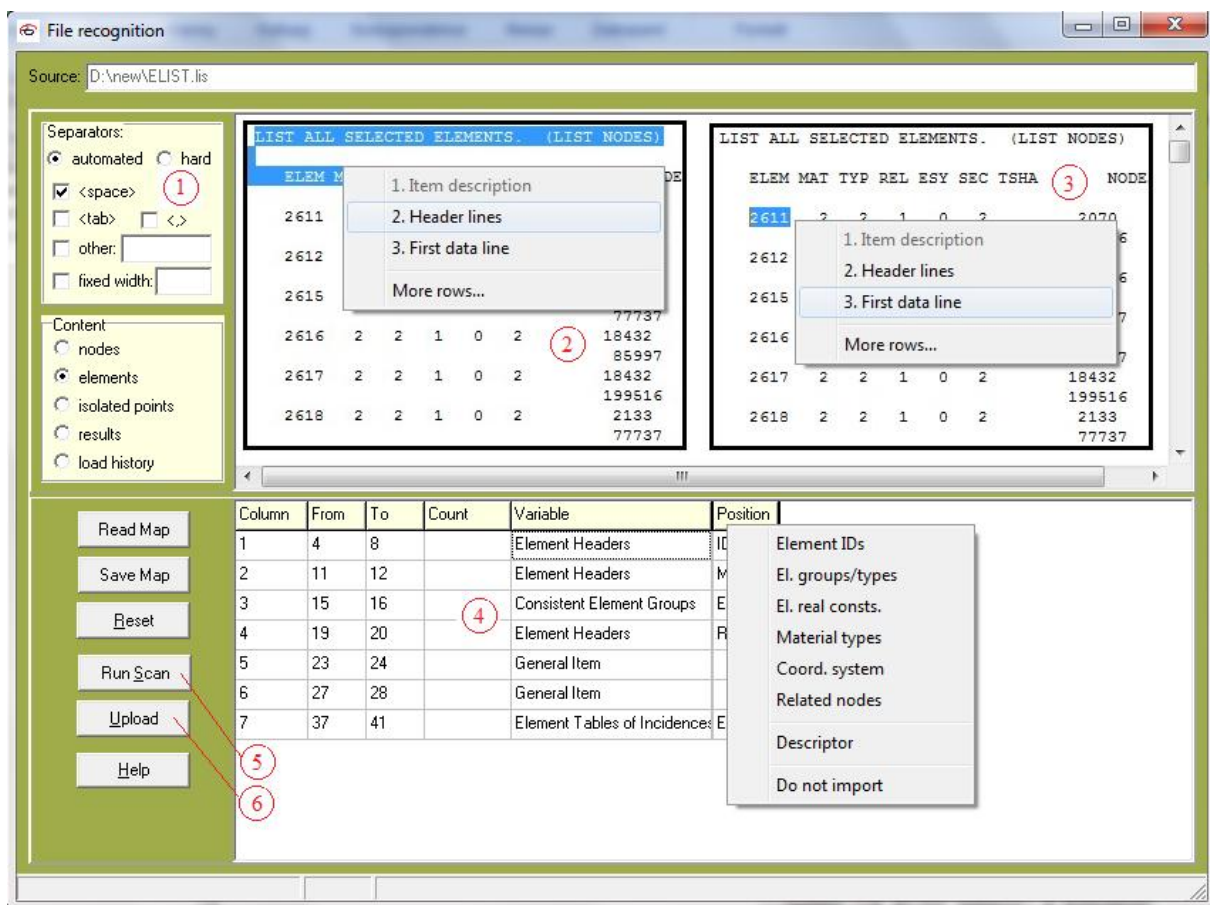
Jako první importujeme uzly, jelikož prvky jsou na uzlech závislé. Do PragTicu tedy načteme soubor NLIST.lis. Na obr. 12 je uveden postup importu uzlů, od jejich načtení až po následné nahrání do PragTicu.



Obr. 12 Mapa uzlů

Line	Node	CSDef	CSRes	X-COORDINATE	Y-COORDINATE	Z-COORDINATE	THYZ	THZX	THXY
1	346	0	0	119	19,436	-13,209	0	0	0
2	353	0	0	119	20,227	-11,962	0	0	0
3	419	0	0	119	20,227	11,962	0	0	0
4	424	0	0	119	19,436	13,209	0	0	0
5	476	0	0	119	17,628	-15,541	0	0	0
6	483	0	0	119	18,569	-14,403	0	0	0
7	545	0	0	119	18,569	14,403	0	0	0
8	557	0	0	119	17,628	15,541	0	0	0
9	793	0	0	119	-7,9603	22,111	0	0	0
10	801	0	0	119	-9,333	21,567	0	0	0
11	950	0	0	119	-23,488	-0,73815	0	0	0
12	958	0	0	119	-23,396	-2,2115	0	0	0
13	977	0	0	119	-23,396	2,2115	0	0	0
14	987	0	0	119	-23,488	0,73815	0	0	0
15	2063	0	0	118,98	-23,063	-3,2864	0	0	0
16	2066	0	0	119	-23,211	-3,6762	0	0	0

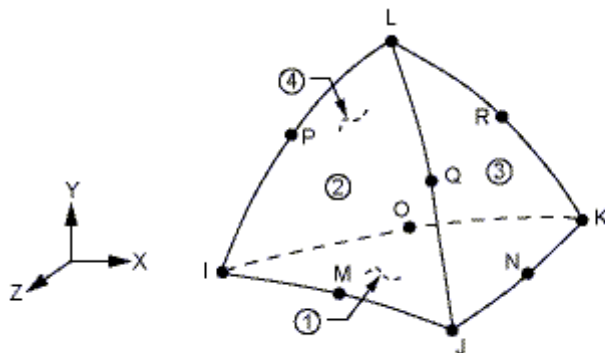
Obr. 13 Ukázka uzlů načtených v PragTicu



Obr. 14 Mapa elementů

Před načtením mapy elementů do PragTicu je třeba ještě přiřadit typ prvků, který PragTic podporuje. Ansys nám automaticky vytvořil jako typ prvků solid187, proto v Pragticu budeme uvažovat ekvivalentní prvek solid92.

Solid187 je stejně jako solid92 deseti uzlový prvek vyššího řádu, vhodný pro vytváření nepravidelných sítí. Tento prvek je definován deseti uzly, z nichž každý má tři stupně volnosti [15]. Důležité je, že číslování uzlů je u obou typů prvků v programu Ansys shodné.

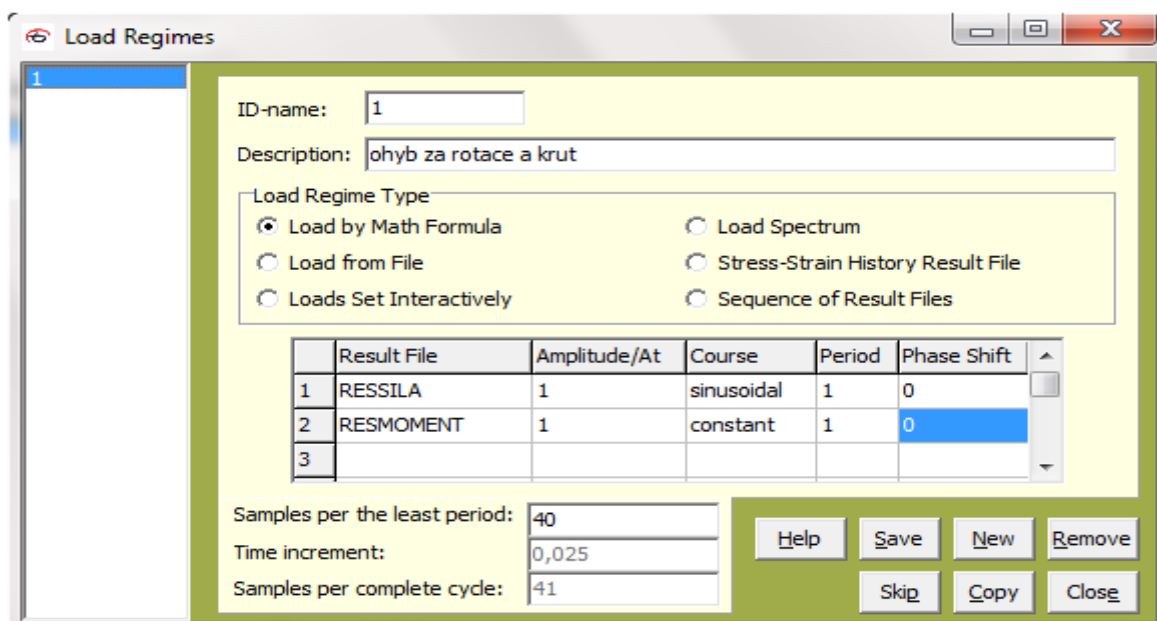


Obr. 15 Prvek Solid187

Line	Element	EG	RC	Material	LocProp	CSRes	Node1	Node2	Node3	Node4	Node5	Node6	Node7	Node8	Node9	Node10
1	2611	1	1	2	0	0	2070	2087	2074	2069	199861	199879	199871	153843	77736	199892
2	2612	1	1	2	0	0	2087	2073	2074	2069	199873	199875	199879	77736	114286	199892
3	2615	1	1	2	0	0	2068	18432	2087	2128	199514	199849	199850	199516	77737	77738
4	2616	1	1	2	0	0	18432	2083	2087	2128	199513	199848	199849	77737	85997	77738
5	2617	1	1	2	0	0	18432	2068	2124	2128	199514	199537	85994	77737	199516	199538
6	2618	1	1	2	0	0	2133	18432	2124	2128	199511	85994	199545	199505	77737	199538
7	2619	1	1	2	0	0	18432	2133	2083	2128	199511	199512	199513	77737	199505	85997
8	2648	1	1	2	0	0	2083	2133	18432	2084	199512	199511	199513	199583	77747	199582
9	2649	1	1	2	0	0	2133	2131	18432	2084	199520	199519	199511	77747	199584	199582
10	2650	1	1	2	0	0	2131	2133	2116	2084	199520	199530	199525	199584	77747	199588
11	2651	1	1	2	0	0	2133	2083	2116	2084	199512	199522	199530	77747	199583	199588

Obr. 16 Ukázka elementů načtených v PragTicu

Načtené elementy a uzly v PragTicu můžeme porovnat pro kontrolu s elementy a uzly vypsane programem Ansys Workbench, které jsou umístěné v příloze 1 a 2. Při nahrávání sad výsledku postupujeme stejně jako u uzlů. Ukázku vypsanych výsledků můžeme najít v příloze 3 a 4. V položce obsah (content) musíme zatrhnout výsledky (results). Postupně načteme výsledky od zátěžné síly a krouticího momentu. Výsledky importujeme pouze na uzlech, které se nacházejí na vrubu hřídele. Počet uzlů se nám tedy zredukuje na 1784. Souřadný systém nastavíme kartézský. Materiál volíme EMM–st60 (materiál patří do kategorie General structural carbon steel). Jedná se o ekvivalent materiálu 11600 (viz příloha 5).



Obr. 17 Nastavení zátěžného režimu

Při nastavování výpočetních metod budeme uvažovat všechny vysokocyklové metody popsané v kapitole 2.2. Výpočet lze spustit na jednu vybranou metodu nebo na několik metod zároveň, tím ale značně vzroste čas výpočtu. Nejrychlejší výpočtový čas vyšel u metod Sinese a Crosslanda, kde byl výpočet spuštěn na všechny uzly a proběhl za patnáct vteřin. U dalších metod je výpočtový čas veliký, proto byl výpočet spuštěn prvně na sadu uzlů, kde došlo k největšímu poškození a poté i na jeden uzel. Výpočtový čas na jeden uzel je okolo deseti vteřin. Na obr. 18 a obr. 19 jsou znázorněny uzly s největším poškozením (sloupec *FI*/Damage). Únavový index *FI* vyjadřuje bezpečnost vůči mezi únavy a výsledku dosáhneme, pokud levou stranu rovnice podělíme pravou stranou rovnice

$$FI = \left(\frac{LHS(load)}{f-1} \right) \quad (19)$$

View FAT_RES Item

Item: FAT_RES Dsc: Fatigue Damage On set: NRESSILA

Location: no On LR: 1 By Method: CROSSLAND

Item	LineAbs	Node	Position	FI/Damage	Det1	Det2	Det3
1	463	7764	CNTR	0,391309843530	92,5512538581	53,6565552666	
2	470	7794	CNTR	0,396213424190	93,7343690411	54,0705593	
3	818	9839	CNTR	0,392012718476	92,7946188329	52,8990653333	
4	1230	16906	CNTR	0,399384947086	94,5907181091	53,3293034333	
5	1231	16907	CNTR	0,395325459191	93,5462761275	53,706054	
6	1327	17864	CNTR	0,397342840164	94,1244614028	52,864004	
7	1394	18066	CNTR	0,397836920615	94,2631297123	52,6902829	

Fast ASCII Copy... Filter... Save Set Close Help

Fatigue Index

Obr. 18 Ukázka uzlů s největším poškozením podle Crosslanda

View FAT_RES0 Item

Item: FAT_RES0 Dsc: Fatigue Damage On set: NRESSILA

Location: no On LR: 1 By Method: SINES

Item	LineAbs	Node	Position	FI/Damage	Det1	Det2	Det3
1	463	7764	CNTR	0,37189463388	65,4436192104	0,025888600000	
2	470	7794	CNTR	0,37664367026	66,2802079792	0,02389263333	
3	818	9839	CNTR	0,37281650133	65,6157042344	0	
4	921	10525	CNTR	0,37025637418	65,1637760758	0,003542000000	
5	1054	12964	CNTR	0,36821131074	64,7882035431	0,044709000000	
6	1230	16906	CNTR	0,38003260347	66,8857382123	0	
7	1231	16907	CNTR	0,37595309078	66,1472062045	0,054054000000	
8	1324	17854	CNTR	0,36780296719	64,7333222260	0	
9	1327	17864	CNTR	0,37815934621	66,5560449334	0	

Fast ASCII Copy... Filter... Save Set Close Help

Fatigue Index

Obr. 19 Ukázka uzlů s největším poškozením podle Sinese.

Výsledky jednotlivých predikčních kritérií pro uzel 16906 jsou shrnuty ve formě Tab. 1

Kritéria	Sines	Crossland	McDiarmid	Findley	Dang Van	Matake
Max. poškození (FI)	0.3800	0.3994	0.3558	0.3766	0.3987	0.3807

Tab. 1 Míra poškození na uzlu 16906

4.3. Export výsledků do Ansysu

Největší poškození vyšlo u uzlu 16906, ale pro následný export do Ansysu použijeme celou sadu uzlů (obr. 20.). PragTic umožňuje vypsání makra, které je možno vyvolat přímo v klasickém rozhraní Ansysu. Pro ukázkou exportu vypíšeme výsledky spočtené metodou podle Crosslanda.

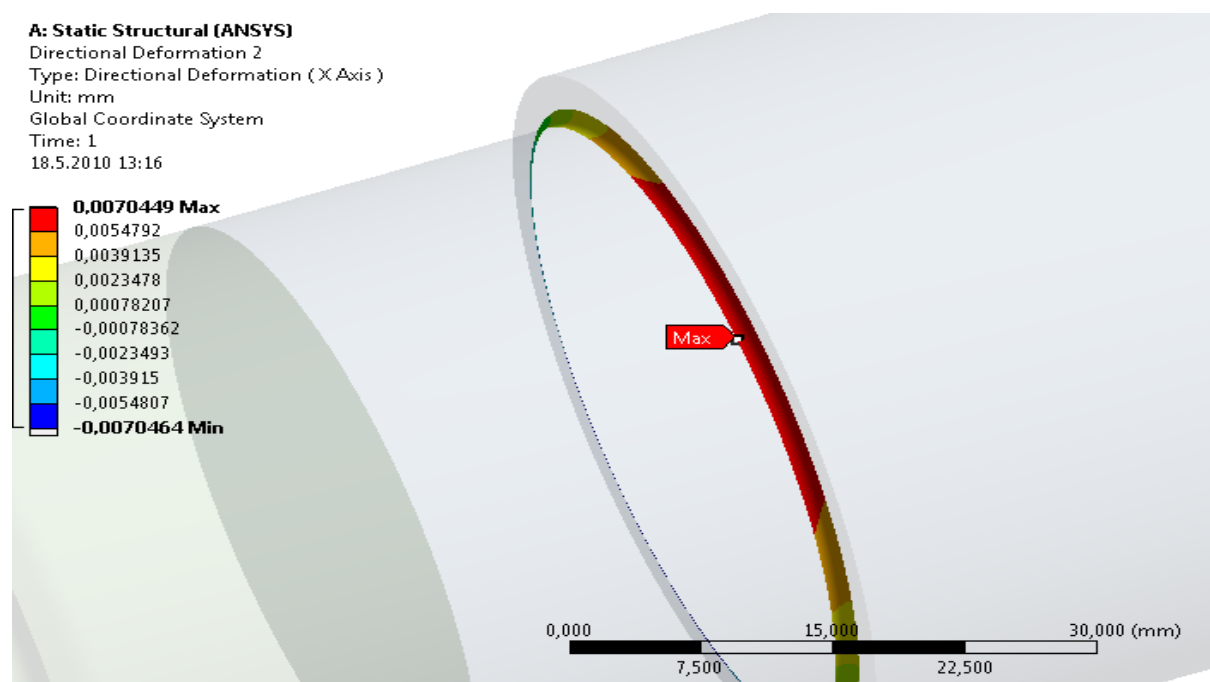
```

/PREP7
DOF,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ
FINISH
/POST1
/SHOW,X11C
/REPLOT
!
DNSOL,545,U,X,0.0374541,26.6993,-1.4265,1.4265,0.578429,0
DNSOL,557,U,X,0.0393096,25.4391,-1.4055,1.4055,0.583109,0
DNSOL,793,U,X,0.0533331,18.7508,-1.27302,1.27302,0.613522,0
DNSOL,801,U,X,0.0533546,18.7425,-1.27283,1.27283,0.613567,0
DNSOL,950,U,X,0.0209754,47.6748,-1.67829,1.67829,0.525152,0
DNSOL,958,U,X,0.0215231,46.4616,-1.66709,1.66709,0.527413,0
DNSOL,977,U,X,0.0208785,47.8961,-1.6803,1.6803,0.524747,0
DNSOL,987,U,X,0.0203273,49.1948,-1.69192,1.69192,0.522412,0
DNSOL,2063,U,X,0.033755,29.6252,-1.47166,1.47166,0.56849,0
DNSOL,2066,U,X,0.0223321,44.7786,-1.65107,1.65107,0.530666,0
DNSOL,2067,U,X,0.0356845,28.0234,-1.44752,1.44752,0.573782,0
DNSOL,2071,U,X,0.0650872,15.364,-1.1865,1.1865,0.634234,0
DNSOL,2072,U,X,0.0702244,14.2401,-1.15351,1.15351,0.642315,0

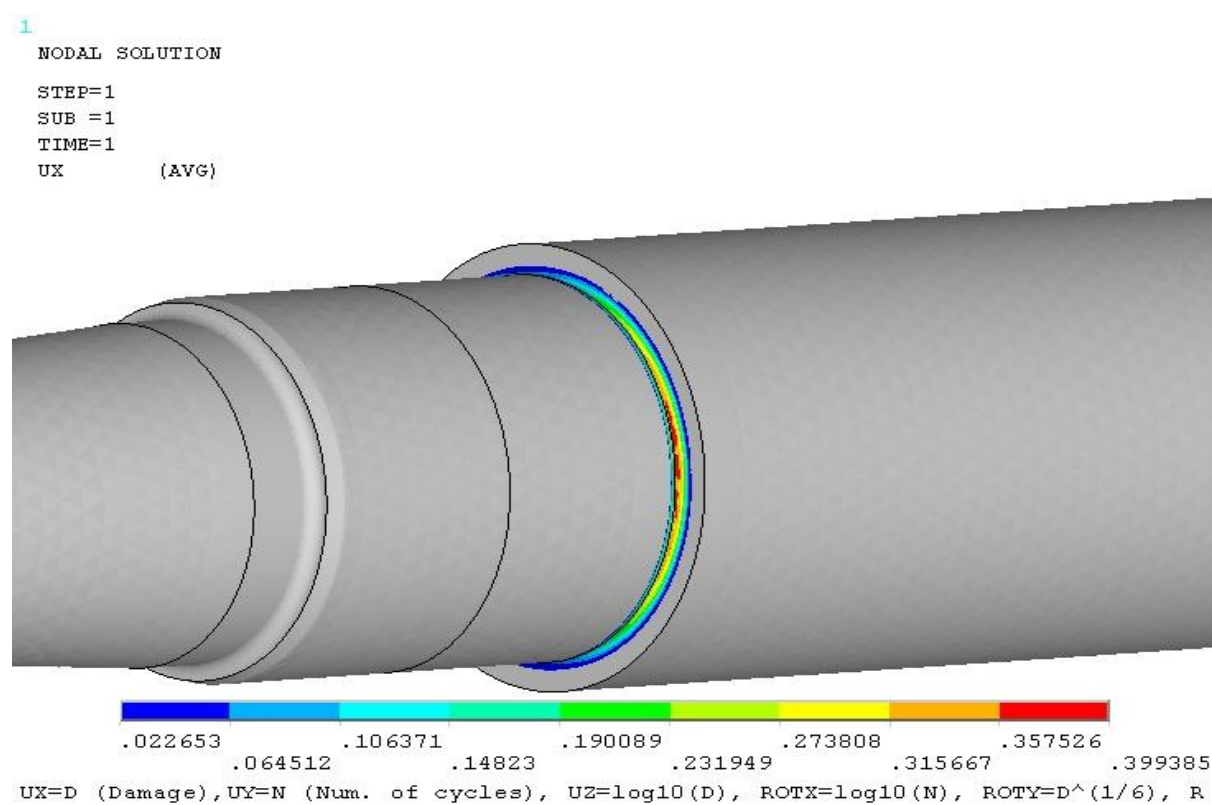
```

Obr. 20 Ukázka makra pro export do Ansysu

Pro ukázkou jsou na obr. 21 uvedeny posuvy z realizovaného výpočtu MKP z programu Ansys Workbench. Tyto výsledky budou přepsány po importu dat z únavové analýzy z programu PragTic. Makro vygenerované programem PragTic není přímo použitelné Ansysem Workbench proto je nutné pro načtení makra použití klasického rozhraní Ansysu (obr. 22).



Obr. 21 Posuv ve směru osy x



Obr. 22 Zobrazení výsledků po exportu dat z PragTicu

5. Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku únavové analýzy v oblasti vysokocyklové únavy materiálu. V první části práce je popsáno rozdělení únavy z hlediska plastické deformace. Dále je probírána životnost tělesa a stručně je uvedeno, jak se postupuje při posuzování životnosti strojních konstrukcí.

Druhá kapitola je věnována popisu programu PragTic. Tento program vznikl jako nástroj pro podporu výpočtů. Je zde podrobně popsáno uživatelské rozhraní a struktura programu se stručným popisem jednotlivých položek menu. U soupisu vysokocyklových predikčních kritérií je vybráno osm kritérií, která jsou stručně popsána a doplněna odkazem na danou literaturu.

Praktická část je součástí třetí a čtvrté kapitoly, která pojednává o konektivitě programu Ansys a PragTic. Je zde podrobně popsáno jak se má postupovat při výpisu dat z konečnoprvkového programu, následném importu do PragTicu, kde je provedena únavová analýza, až po následný export dat zpětně do konečnoprvkového programu Ansys. Vše je pak ještě jednou shrnuto ve čtvrté kapitole, která se zabývá danou problematikou v praxi. Použití PragTicu je zde ukázáno formou doprovodných obrázků. Únavová analýza na zvoleném příkladě byla provedena v programu PragTic v02betaL. Jako příklad k řešení byla zvolena hřídel ze zkušebního stroje pro výzkum kontaktní únavy, jenž byl navržen v rámci diplomové práce [17]. Hřídel je namáhána kombinací krutu a ohybu za rotace. Je uchycena ve dvou ložiskách a je zatížena konstantním krouticím momentem o velikosti 200 Nm a přítlakovou silou o velikosti 8370 N. Analýza byla provedena v programu Ansys Workbench. Nejkritičtější místo se nacházelo pod ložiskem A, kde hodnota průběhu ekvivalentního napětí byla 120,84 MPa. Pro import do PragTicu byla vybrána pouze ta část, kde vzniká maximální ekvivalentní napětí. Počet uzlů a prvků se tedy výrazně snížil, čímž bylo dosaženo ke zkrácení času výpočtové únavové analýzy. V PragTicu byla spuštěna únavová analýza více metodami na sadu uzlů, kde bylo výpočtem dle Crosslanda stanoven uzel s největším poškozením. Další metody byly spuštěny následně na tomto jediném uzlu. U každé metody bylo dosaženo rozdílného výpočetního času. Největší poškození vyšlo u uzlu 16906 dle Crosslanda, kde míra poškození dosahuje hodnoty 0,3994. Toto číslo vyjadřuje vlastně bezpečnost vůči mezi únavy. Vzhledem k tomu, že uvažované hodnoty krouticího momentu a přítlakové síly jsou maximálními hodnotami pro navržené zkušební zařízení lze z výpočtové únavové analýzy

usoudit, že materiál 11600 vyhovuje nárokům na dlouhodobý provoz zkušebního zařízení. V bakalářské práci však nebyly sledovány další aspekty jako například otlačení hřídele od zkušebního vzorku.

6. Seznam použité literatury

- [1] LAUSCHMANN H., *Únava materiálu – Mezní stavy I*, ČVUT Praha, 2007.
- [2] KUČERA, J. *Stručný úvod do mechaniky lomu, Část 2 – Únava materiálu*, skripta FS VŠB-TU OSTRAVA, 1994.
- [3] RUŽIČKA M., HANKE M., ROST M., *Dynamická pevnost a životnost*, ČVUT Praha, 1987.
- [4] RŮŽIČKA, M. *Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí*. Učební texty. Ústav mechaniky FS ČVUT Praha, říjen 1998. [Cit 05/05/2003]
- [5] PAPUGA, J. *Mapping of Fatigue Damages – Program Shell of FE-Calculatation*. PhD Thesis: Mechanics of Solids, Deformable Bodies and Continua branch, FSI ČVUT in Prague, 2005, 115s.
- [6] CROSSLAND, B.: *Effect of large hydrostatic pressure on the torsional fatigue strength of an alloy steel*. In: Proc. Int. Conf. on Fatigue of Metals, Institution of Mechanical Engineers, London, 1956, pp. 138-149.
- [7] SINES, G.: *Failure of materials under combined repeated stresses with superimposed static stresses*. [NACA-TN-3495]. Washington, NACA 1955.
- [8] MCDIARMID, D. L.: *A shear stress based critical-plane criterion of multiaxial fatigue failure for design and life prediction*. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct 17, 1994, No. 12, pp. 1475-1484.
- [9] FINDLEY, W. N.: *Fatigue of Metals Under Combinations of Stresses*, Transactions of ASME (vol. 79), 1957.
- [10] PAPADOPOULOS, I. V.; DAVOLI, P.; GORLA, C.; FILIPPINI, M.; BERNASCONI, A.: *A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals*. Int. J. Fatigue 19, 1997, No. 3, pp. 219-235.
- [11] DANG VAN, K.: *Sur la résistance a la fatigue des métaux. These de Doctorat es Sciences, Sci. Techniq. l'Armement*, 47, 1973, p. 647.

- [12] SPAGNOLI, A.: *A new high-cycle fatigue criterion applied to out-of-phase biaxial stress state. International Journal of Mechanical Sciences* 43, 2001, pp. 2581-2595.
- [13] PAPADOPOULOS, I. V.: *Fatigue polycyclique des métaux: Une nouvelle approche.* [PhD thesis], Paris, École Nationale des Ponts et Chaussées 1987.
- [14] PAPUGA, J.; RŮŽIČKA, M.: *Two new multiaxial criteria for high cycle fatigue computation.* Int. J. Fatigue 30, 2008, No. 1, pp. 58-66.
- [15] ANSYS INC. *ANSYS Academic Research, Release 12.0 Help Systém, Theory reference.*
- [16] Srovnávací tabulka materiálů ČSN – EN. Dostupná na:
<http://www.vatrans.cz/tabulka.htm>
- [17] ŠOFER, M.: *Koncepční návrh úprav zkušebního stroje pro výzkum kontaktní únavy* [Diplomová práce]. Ostrava, VŠB-TU Ostrava 2009.

Seznam příloh:

Příloha 1 – NLIST.lis

Příloha 2 – ELIST.lis

Příloha 3 – Výsledky od krouticího momentu

Příloha 4 – Výsledky od přítláčné síly

Příloha 5 – Srovnávací tabulka materiálů ČSN – EN

Příloha č. 1

LIST ALL SELECTED NODES.				DSYS=	0		
SORT	TABLE	ON	NODE	NODE	NODE		
NODE	X	Y	Z	THXY	THYZ	THZX	
346	119.00	19.436	-13.209	0.00	0.00	0.00	
353	119.00	20.227	-11.962	0.00	0.00	0.00	
419	119.00	20.227	11.962	0.00	0.00	0.00	
424	119.00	19.436	13.209	0.00	0.00	0.00	
476	119.00	17.628	-15.541	0.00	0.00	0.00	
483	119.00	18.569	-14.403	0.00	0.00	0.00	
545	119.00	18.569	14.403	0.00	0.00	0.00	
557	119.00	17.628	15.541	0.00	0.00	0.00	
793	119.00	-7.9603	22.111	0.00	0.00	0.00	
801	119.00	-9.3330	21.567	0.00	0.00	0.00	
950	119.00	-23.488	-0.73815	0.00	0.00	0.00	
958	119.00	-23.396	-2.2115	0.00	0.00	0.00	
977	119.00	-23.396	2.2115	0.00	0.00	0.00	
987	119.00	-23.488	0.73815	0.00	0.00	0.00	
2063	118.98	-23.063	-3.2864	0.00	0.00	0.00	
2066	119.00	-23.211	-3.6762	0.00	0.00	0.00	
2067	118.98	-22.938	-4.0284	0.00	0.00	0.00	
2071	118.82	-22.561	-4.0527	0.00	0.00	0.00	
2072	118.82	-22.431	-4.7130	0.00	0.00	0.00	
2074	118.91	-22.676	-4.3797	0.00	0.00	0.00	
NODE	X	Y	Z	THXY	THYZ	THZX	
2081	118.98	-22.799	-4.7441	0.00	0.00	0.00	
2084	119.00	-22.934	-5.1264	0.00	0.00	0.00	
2085	118.98	-22.649	-5.4593	0.00	0.00	0.00	
2142	118.98	-14.481	-18.240	0.00	0.00	0.00	
2145	119.00	-14.403	-18.569	0.00	0.00	0.00	
2146	118.98	-13.899	-18.693	0.00	0.00	0.00	
2150	118.82	-13.503	-18.525	0.00	0.00	0.00	
2151	118.83	-12.911	-18.964	0.00	0.00	0.00	
2153	118.92	-13.399	-18.820	0.00	0.00	0.00	
2160	118.98	-13.303	-19.126	0.00	0.00	0.00	
2163	119.00	-13.209	-19.436	0.00	0.00	0.00	
2164	118.98	-12.693	-19.541	0.00	0.00	0.00	
2213	118.98	12.079	19.914	0.00	0.00	0.00	
2216	119.00	11.962	20.227	0.00	0.00	0.00	
2217	118.98	11.444	20.289	0.00	0.00	0.00	

Příloha č. 2

LIST ALL SELECTED ELEMENTS. (LIST NODES)													
ELEM	MAT	TYP	REL	ESY	SEC	TSHA	NODES						
2611	2	2	1	0	2		2070	2087	2074	2069	199861	199879	199871 153843
							77736	199892					
2612	2	2	1	0	2		2087	2073	2074	2069	199873	199875	199879 77736
							114286	199892					
2615	2	2	1	0	2		2068	18432	2087	2128	199514	199849	199850 199516
							77737	77738					
2616	2	2	1	0	2		18432	2083	2087	2128	199513	199848	199849 77737
							85997	77738					
2617	2	2	1	0	2		18432	2068	2124	2128	199514	199537	85994 77737
							199516	199538					
2618	2	2	1	0	2		2133	18432	2124	2128	199511	85994	199545 199505
							77737	199538					
2619	2	2	1	0	2		18432	2133	2083	2128	199511	199512	199513 77737
							199505	85997					
2648	2	2	1	0	2		2083	2133	18432	2084	199512	199511	199513 199583
							77747	199582					
2649	2	2	1	0	2		2133	2131	18432	2084	199520	199519	199511 77747
							199584	199582					
2650	2	2	1	0	2		2131	2133	2116	2084	199520	199530	199525 199584
							77747	199588					
ELEM	MAT	TYP	REL	ESY	SEC	TSHA	NODES						
2651	2	2	1	0	2		2133	2083	2116	2084	199512	199522	199530 77747
							199583	199588					
2654	2	2	1	0	2		2149	2166	2153	2148	199463	199481	199473 156094
							77748	199494					
2655	2	2	1	0	2		2166	2152	2153	2148	199475	199477	199481 77748
							125133	199494					
2665	2	2	1	0	2		2163	2162	2195	2161	199254	199209	199257 199489
							199483	77751					
2666	2	2	1	0	2		2163	2195	2165	2161	199257	199180	199250 199489
							77751	125149					

Příloha č. 3

PRINT 5 NODAL SOLUTION PER NODE

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****

PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
21043	-0.88654E-01	-0.67687E-01	-0.94766E-01	-0.13732E-01	-0.62641	-3.1277
21044	1.3764	-0.94114E-01	0.11033E-01	-0.35503	-0.44355	-3.1117
21045	2.7709	-0.12998	0.15407E-01	-0.68430	-0.41262	-2.9502
21046	4.1295	-0.20012	0.33996	-0.95735	-0.49530	-2.6469
21047	5.3231	-0.39380	0.45305	-1.1178	-0.57541	-2.3440
21048	6.4141	-0.45778	0.44192	-1.2968	-0.43825	-1.9662
21049	7.4495	-0.50253	0.39511	-1.3640	-0.37376	-1.7370
21050	8.4847	-0.43878	0.24577	-1.3123	-0.27621	-1.4058
21051	9.2529	-0.44640	0.48882	-1.1234	-0.20400	-1.0102
21052	9.7378	-0.55606	0.39732	-0.99133	-0.18333	-0.71422
21053	10.261	-0.50196	0.48272	-0.71258	-0.90280E-01	-0.53199
21054	10.572	-0.50617	0.46733	-0.35137	-0.52860E-01	-0.42501
21055	10.734	-0.50537	0.42317	-0.11256E-02	0.18680E-02	-0.38791
21056	10.622	-0.47430	0.52841	0.35502	0.53819E-01	-0.44844
21057	10.098	-0.51684	0.68147	0.72538	0.82219E-01	-0.43785
21058	9.8813	-0.46136	0.53093	0.95165	0.15678	-0.78307
21059	9.1888	-0.53951	0.43091	1.1786	0.24028	-1.0504
21060	8.4005	-0.52941	0.65601	1.2664	0.29767	-1.3505
21061	7.6043	-0.36693	0.49348	1.3339	0.33277	-1.7127
21062	6.4971	-0.32715	0.16100	1.3147	0.35013	-2.1087
21063	5.3755	-0.24159	0.20098	1.2165	0.39819	-2.5210
21064	4.0940	-0.17725	0.15379	0.98907	0.36076	-2.7706
21065	2.6268	-0.26632	0.39392E-01	0.74234	0.54185	-2.9274
21066	1.4699	-0.23704E-01	0.17541	0.35604	0.63035	-3.0221
21067	-0.13980E-02	-0.17909E-02	-0.58173E-02	0.11698E-02	0.46435	-3.1423
21068	-1.3742	0.87715E-01	0.16299E-01	-0.34832	0.42362	-3.0971
21069	-2.8228	0.11787	-0.24906	-0.68904	0.55240	-2.8603
21070	-4.0346	0.34426	-0.37296	-0.97175	0.65464	-2.6643
21071	-5.2281	0.40742	-0.23873	-1.1961	0.49590	-2.4251
21072	-6.5395	0.33418	-0.49266	-1.2905	0.43158	-2.0729
21073	-7.5132	0.48060	-0.54228	-1.3017	0.37872	-1.6531
21074	-8.3250	0.54540	-0.73009	-1.3674	0.29881	-1.3517
21075	-9.2047	0.51231	-0.62828	-1.1574	0.21007	-1.0162
21076	-9.8142	0.51511	-0.60097	-0.95012	0.13346	-0.75081
21077	-10.277	0.53078	-0.46572	-0.65935	0.11607	-0.56166

Příloha č. 4

PRINT 5 NODAL SOLUTION PER NODE

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****

PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL 1

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
21043	-0.88654E-01	-0.67687E-01	-0.94766E-01	-0.13732E-01	-0.62641	-3.1277
21044	1.3764	-0.94114E-01	0.11033E-01	-0.35503	-0.44355	-3.1117
21045	2.7709	-0.12998	0.15407E-01	-0.68430	-0.41262	-2.9502
21046	4.1295	-0.20012	0.33996	-0.95735	-0.49530	-2.6469
21047	5.3231	-0.39380	0.45305	-1.1178	-0.57541	-2.3440
21048	6.4141	-0.45778	0.44192	-1.2968	-0.43825	-1.9662
21049	7.4495	-0.50253	0.39511	-1.3640	-0.37376	-1.7370
21050	8.4847	-0.43878	0.24577	-1.3123	-0.27621	-1.4058
21051	9.2529	-0.44640	0.48882	-1.1234	-0.20400	-1.0102
21052	9.7378	-0.55606	0.39732	-0.99133	-0.18333	-0.71422
21053	10.261	-0.50196	0.48272	-0.71258	-0.90280E-01	-0.53199
21054	10.572	-0.50617	0.46733	-0.35137	-0.52860E-01	-0.42501
21055	10.734	-0.50537	0.42317	-0.11256E-02	0.18680E-02	-0.38791
21056	10.622	-0.47430	0.52841	0.35502	0.53819E-01	-0.44844
21057	10.098	-0.51684	0.68147	0.72538	0.82219E-01	-0.43785
21058	9.8813	-0.46136	0.53093	0.95165	0.15678	-0.78307
21059	9.1888	-0.53951	0.43091	1.1786	0.24028	-1.0504
21060	8.4005	-0.52941	0.65601	1.2664	0.29767	-1.3505
21061	7.6043	-0.36693	0.49348	1.3339	0.33277	-1.7127
21062	6.4971	-0.32715	0.16100	1.3147	0.35013	-2.1087
21063	5.3755	-0.24159	0.20098	1.2165	0.39819	-2.5210
21064	4.0940	-0.17725	0.15379	0.98907	0.36076	-2.7706
21065	2.6268	-0.26632	0.39392E-01	0.74234	0.54185	-2.9274
21066	1.4699	-0.23704E-01	0.17541	0.35604	0.63035	-3.0221
21067	-0.13980E-02	-0.17909E-02	-0.58173E-02	0.11698E-02	0.46435	-3.1423
21068	-1.3742	0.87715E-01	0.16299E-01	-0.34832	0.42362	-3.0971
21069	-2.8228	0.11787	-0.24906	-0.68904	0.55240	-2.8603
21070	-4.0346	0.34426	-0.37296	-0.97175	0.65464	-2.6643
21071	-5.2281	0.40742	-0.23873	-1.1961	0.49590	-2.4251
21072	-6.5395	0.33418	-0.49266	-1.2905	0.43158	-2.0729
21073	-7.5132	0.48060	-0.54228	-1.3017	0.37872	-1.6531
21074	-8.3250	0.54540	-0.73009	-1.3674	0.29881	-1.3517
21075	-9.2047	0.51231	-0.62828	-1.1574	0.21007	-1.0162
21076	-9.8142	0.51511	-0.60097	-0.95012	0.13346	-0.75081
21077	-10.277	0.53078	-0.46572	-0.65935	0.11607	-0.56166

Příloha č. 5

ČSN	značka	DIN	ČSN	značka	DIN
10000	St 33 - 1	1.0033	11503	TStE 355	1.0566
10004	St 33	1.0035	11523	St 52 - 3	1.0570
10216	Bst 22 = IG	1.0003	11529	St 52 - 3Cu3	1.0585
10216	34 GU	1.0003	11531	ASt 52	1.0577
10420	USt 42 - 1	1.0075	11531	St 53 7	1.0577
10500	St 50 - 1	1.0052	11550	St 55	1.0507
11109	9SMn28	1.0715	11600	St 60 - 2	1.0060
11110	10S20	1.0721	11700	St 70 - 2	1.0070
11120	22S20	1.0724	12010	Ck 10	1.1121
11300	USt 14	1.0314	12010	C 10	1.1121
11300	USt 4	1.0314	12014	RFe 100	1.1014
11301	St 13	1.0333	12014	RFe 80	1.1014
11301	St 3	1.0333	12020	Ck 15	1.1141
11301	USt 13	1.0333	12020	C 15	1.1141
11305	St 14	1.0338	12021	St 35.8	1.0305
11305	St 4	1.0338	12022	St 45.8	1.0405
11320	St 22	1.0320	12023	Ck 15	1.1141
11331	St 12	1.0330	12024	C 22	1.0402
11331	St 2	1.0330	12030	Ck 25	1.0406
11343	USt 34 - 2	1.0028	12030	C 25	1.0406
11353	St 35	1.0308	12031	Ck 30	1.0528
11364	40NiCrMoV4 = HI	1.0345	12031	C 30	1.0528
11366	40NiCrMoV4 = HI	1.0345	12040	Ck 35	1.0501
11368	Ast 35	1.0346	12040	C 35	1.0501
11373	Ust 37 - 2	1.0036	12041	Ck 40	1.1186
11375	RSt 37 - 2	1.0038	12050	Ck 45	1.0503
11378	St 37 - 3	1.0116	12050	C 45	1.0503
11379	Rst 27 - 2Cu3	1.0167	12060	C 55	1.0535
11381	Ast 35	1.0346	12060	Ck 55	1.0535

